# SENSORY PARAMETRICS

Beitrag zur Entwicklung digital gestützter Produktionsverfahren zur adaptiven Herstellung doppelt gekrümmter Betonbauteile in kleinen Losgrößen mittels eines Industrieroboters



Dipl.-Ing. Felix Amtsberg Msc.

#### **SENSORY PARAMETRICS**

Beitrag zur Entwicklung digital gestützter Produktionsverfahren zur adaptiven Herstellung doppelt gekrümmter Betonbauteile in kleinen Losgrößen mittels eines Industrieroboters

#### **DISSERTATION**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

#### **Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dr. Ing. Stefan Peters

Institut für Tragwerksentwurf

Prof. Dr. Martin Bechthold Kumagai Professor of Architectural Technology

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbe gegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die de entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht h Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation iden	en benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich abe. Das in TUGRAZonline hochgeladene
I declare, that I have authored this thesis independently, sources/resources, and that I have explicitly indicated literally or by content from sources used. The text docur to the present doctoral dissertation.	all material which has been quoted either
Datum / Date	Unterschrift / Signature

"Immer dann, we Architektur veränd A	enn sich die l dern, verände Andreas Ruby nach K	ert sich auch	edingungen die Architek	der tur"

## KURZFASSUNG

Die digital gestützte Fabrikation hat sich in den letzten Jahren als schnell wachsendes Forschungsgebiet in Architektur und Bauwesen etabliert. Der Industrieroboter ist hierbei zum einem zentralen Medium der direkten Materialisierung architektonischer Konzepte geworden. Besonders die Versatilität des Systems, die Wiederholgenauigkeit und die programmierbare automatisierte Umsetzung selbstähnlicher Fertigungsstrategien, lässt ihn als ideales Werkzeug zur Herstellung individueller Bauteile erscheinen.

In Kombination mit den baustofftechnologischen Weiterentwicklungen im Bereich des Betonbaus, hat sich in der jüngsten Vergangenheit das Forschungsfeld zu adaptiven Betonschalungen neu entwickelt, und sich daraus die Forschungsfrage abgeleitet:

Können Schalen- und Freifromgeometrien aus Beton, wenn sie in vorfabrizierbare Bauteile segmentiert werden, ressourcenschonend und kosteneffizient von einem Industrieroboter hergestellt werden?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage wurde das FFG-Forschungsprojekt Schalentragwerke aus UHPC-Fertigteilen - Dünnwandige gekrümmte Bauteile aus hochfesten Betonen für eine ressourcenschonende innovative Schalenbauweise entwickelt, zu dem diese Arbeit zwei zusammenhängende Teilbereiche des Projektes abdeckt: Die digitale Fabrikation, also die Umwandlung einer Geometrie in einen Maschinencode und die Erfassung und Analyse der infolge des Prozesses resultierenden Abweichung.

Dazu werden als erstes die Programme zur parametrischen Einstellung mittels eines Industrieroboters entwickelt und geschrieben, und somit die installierte Roboteranlage zur Materialisierung der digitalen Geometrie befähigt.

In der Folge werden sämtliche Arbeitsschritte, von der Einstellung des adaptiven Schalungssystems, über die Abnahme der verwendeten Schalkörper , bis zur Betonage und der abschließenden Formatierung der hergestellten Betonbauteile, dokumentiert und vermessen, und somit die Ursachen und Auswirkungen der Abweichungen von Arbeitsschritt zu Arbeitsschritt beschrieben und quantifiziert. Damit ist eine Aussage zur tatsächlich erreichbaren Genauigkeit dieser digital generierten und hochpräzise gefertigten UHPC-Bauteile möglich.

Auf Grundlage der Erkenntnisse werden Vorschläge zur Optimierung der Produktion, durch das Miteinbeziehen sensorischer Hilfsmittel während des Fabrikationsprozesses entwickelt und in ersten Experimenten getestet.

Die gegenständliche Arbeit stellt einen baupraktischen Beitrag zur digital gestützten Fabrikation von doppelt gekrümmten Betonbauteilen mit der Losgröße 1 dar, und liefert darüber hinaus einen Beitrag zur Diskussion über feedbackbasierten Prozessentwicklung und Ausführung im Herstellungsprozesse architektonischer Bauteile.

## **ABSTRACT**

During the last few years, digital fabrication has established itself as a fast growing field of research in architecture and the building industry. Industrial robots have become a main instrument for the direct materialization of architectural concepts.

Especially its versatility, the repeat accuracy and the programmable automated execution of self-similar production strategies, give industrial robots the appearance to be an ideal tool for the realization of individual construction elements.

Combined with the progress in building material technology, especially in the field concrete constructions, the research field of adaptive moulding strategies has redeveloped and led to the following research question:

Does the industrial robot enable the resource efficient and cost effective production of concrete shells and freeform structures if they are subdivided into elements which can be prefabricated?

To answer this question, the FFG-Bridge Project Shell Structures made of Ultra High Performance Concrete (Thin-Walled Double Curved Construction Elements made of High-Performance Concrete for innovative Shell Fabrication was initialized. This thesis covers two connected parts of the project: The digital fabrication, that means the translation of a digital geometry into a machine code, and the collection, analysis and evaluation of the deviation emerging as a result of the process.

Therefor a programme for the parametrical adjustment is developed and scripted. It is customized for the installed robot system to enable the direct materialization of a desired geometry.

Additionally every work step is measured, documented analysed and evaluated, starting with the adjustment of the adaptive formwork, and followed by the casted moulds, to the fabricated and formatted concrete elements. This allows a description and quantification of cause and effect of any deviation between the different work steps and that way a statement of the effectively realizable accuracy of these digitally generated and highly precisely manufactured UHPC-elements.

Based on this evaluation, suggestions for an optimization of the fabrication process using sensory technology during the manufacturing process, are proposed, developed and tested in first experiments.

The presented work contributes a feasible concept for the fabrication of double-curved concrete elements with a batch size of 1, but delivers a contribution to the discussion of feedback based process development and actuation for the manufacturing process of construction elements for architectural purposes.

### **INHALTSVERZEICHNIS**

	Kurztassung / Abstract	8-11
	Inhaltsverzeichnis	13
	Danksagung	15
	Zur Gliederung und Abgrenzung der Arbeit	17
1.	Formenbau als wissenschaftliches Problem	18-31
1.1 1.2	Kontextualisierung im Architektonischen Diskurs und Methodik zur Lösung Abgrenzung der Forschungsarbeiten	19-29 30-31
2.	Vorstudien	31-55
2.1 2.2 2.3 2.4	Adaptive Schalungen Ansteuerung Schaltischvarianten Trockene Verbindungen The RobArch	34-43 44-47 48-51 52-55
3.	Adaptive Herstellung von doppelt gekrümmten UHPC-Schalen	56-65
3.1.	Das Pixelfeld und seine Ansteuerung	58-65
4.	Ergebnisse und Auswertungen	66-185
4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7	Messprozeduren und Datenerfassung Einstellungsgenauigkeit des Pixelfeldes Die Schalhäute Die Sandformen Die Sichtflächen Die Kontaktflächen Zusammenfassung der ermittelten Abweichungen Mock-Up	66-79 80-85 86-91 92-110 112-128 130-154 156-163 164-183
5.	Sensory Parametrics	186-206
5.1 5.2 5.2 5.3	Sensorgestützte robotische Fabrikation Sensorgestützte Ansteuerung Robotergestützte Messverfahren Conclusio und Perspektive	187-189 190-195 196-203 204-206
	Appendix	207-307
	Literaturverzeichnis Bilderverzeichnis Anhang Messergebnisse	209-212 213-216 219-307

## DANKSAGUNG

Diese Arbeit bildet den Abschluss meiner beinahe sechsjährigen Tätigkeit als Universitätsassistent am Institut für Tragwerksentwurf.

Während dieser Tätigkeit ergab sich die Möglichkeit zur Planung, Einrichtung und Nutzung des mit drei Industrierobotern ausgestatteten ABB-Labors. Die unterschiedlichen Forschungsprojekte des Instituts, die Lehre, Workshops und der Austausch mit anderen Einrichtungen, haben die eigene Arbeit stark geprägt, fortwährend weiterentwickelt und die finale Forschungsfrage dieser Dissertation ergeben.

Mein besonderer Dank gilt daher vor allem Professor Stefan Peters, der mir als Institutsvorstand vom ersten Tage meiner Beschäftigung an, als Mentor und Ratgeber zur Seite gestanden hat. Seine Anregungen und die zahlreichen thematischen Diskussionen waren besonders hilfreich, dieser vielschichtigen Auseinandersetzung mit einem so jungen Forschungsgebiet eine Richtung zu geben und in der Struktur einer Promotionsarbeit zusammenzufassen.

Ebenso möchte ich mich bei Prof. Martin Bechthold bedanken, dessen aufgeschlossene und fördernde Art zu jedem Zeitpunkt unterstützend war. Von seiner Expertise, Beratung und seiner freundschaftlichen Aufnahme an der Harvard University, Graduate School of Design, hat meine gesamte Arbeit, und nicht nur die hier vorliegende Dissertation, profitiert.

Besonderer Dank gilt auch Assoc.Prof. Andreas Trummer, der diese Arbeit ebenso intensiv mitbetreut hat und dessen offene Art und anregende Unterstützung nicht nur immer wieder neue Perspektiven aufgezeigt haben, sondern auch besonders hilfreich bei der Reflektion und Schärfung der eigenen Gedanken war.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Freunden und fachlichen Gesprächspartnern in dieser Arbeit Eva Pirker, Franz Forstlechner, Johannes Hartmann, Gernot Parmann, Christian Pichlkastner und Felix Raspall bedanken, deren unterschiedliche Perspektiven, kritische Auseinandersetzung und tiefes Interesse an meiner Arbeit und meiner Person, immer wieder aufbauend und unterstützend waren.

Dem Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen möchte ich für die Bereitschaft zur gemeinsamen Forschung und der damit verbundenen Bereitstellung ihrer Ressourcen zum Versuch "Robotergestützte Messverfahren" danken.

Abschließend möchte ich mich noch beim gesamten Institut und hier als erstes unserem Sekretariat mit unseren guten Seelen Andrea Schmallegger, Sonja Senekowitsch und Sandra Lücking bedanken. Aber auch bei meinen Kollegen und Freunden, Georg Hansemann, Robert Schmid und Joshua Tapley, die diesen Ort in den letzten Jahren zu meiner Heimat haben werden lassen und zu denen ich hoffentlich nie den Kontakt verliere.

Ich widme diese Arbeit meiner Familie, die mein gesamtes Leben immer für mich da waren. Meiner Mutter Silvia Amtsberg und in Gedanken meinem Vater Klaus Amtsberg ohne die diese Arbeit nicht existieren würde, meinem Bruder Nico, meiner Schwägerin Sabrina und Erik und Klara, die trotz wachsender Entfernung immer bei mir sein werden.

#### Zur Gliederung und Abgrenzung der Arbeit

Die hier präsentierte Arbeit stellt einen Beitrag im Rahmen des 3-jährigen interdisziplinären Forschungsprojektes, "Schalentragwerke aus UHPC-Fertigteilen - Dünnwandige gekrümmte Bauteile aus hochfesten Betonen für eine ressourcenschonende innovative Schalenbauweise" dar, dass neben dieser Dissertation noch den Kern der beiden Arbeiten von Gerhard Santner "Fügetechnik im UHPC-Schalenbau" und Gernot Parmann "Adaptive Schalungstechnik zur Herstellung doppelt gekrümmten Betonbauteile (Arbeitstitel)" bildet. Die eigene Arbeit ist wie folgt gegliedert:

- 1. Wissenschaftliches Problem, Kontextualisierung im Architektonischen Diskurs und Abgrenzung zu begleitenden Arbeiten
  - Im ersten Teil der Arbeit wird der Hintergrund zur behandelten Forschungsfrage geklärt und die Relevanz einer solchen Arbeit im architektonischen Kontext belegt. Dazu werden sowohl die Zusammenhänge des Schalen- und Freiformbaus, als auch existierende Ideen und Strategien zu einer effizienten Produktion dieser Konzepte betrachtet.
  - Die zurückliegenden und aktuellen Entwicklungen der Baurobotik werden in diese Recherche integriert und auf dieser Basis eine Ableitung geschaffen, die die Verwendung des Industrieroboters als ein logisches Instrument der Materialisierung einer solchen Architektur auf experimenteller Basis präsentiert.
- 2. Vorstudien
  - Der zweite Teil befasst sich mit den für diese Dissertationen relevanten Vorstudien und Versuchen die im Rahmen der Forschung entstanden sind. Durch die konkrete und tiefere Betrachtung der zwei im Rahmen des Großprojektes erarbeitet Teilaspekte "Robotergestützte Einstellung der Adaptiven Schalung" und "Formatschleifen der Kontaktflächen", werden der Fokus der Arbeit und die Abgrenzung zu den anderen Beiträgen im Kontext des Forschungsprojektes sichtbar.
- 3. Detailstudie im Rahmen des FFG-Projektes (Ansteuerung) Im dritten Teil wird das Script zur Ansteuerung der adaptiven Schalung erläutert und auf seine Spezifikationen eingegangen.
  - Detailstudie im Rahmen des FFG-Projektes (Observation)
- Im vierten Teil werden sämtliche praktischen Ausführungsschritte, von der Umsetzung des generierten Maschinencode, über die Formabnahme und Nachbearbeitung, bis zur Fügung der gefertigten Bauteile zu einem Ausschnittsmodell aus neun Einzelelementen aufgenommen und analysiert. Somit wird eine Aussage über die Auswirkung der erreichten Fertigungstoleranzen der Einzelteile auf das neu entwickelte Bausystems ermöglicht.
- 5. Weiterentwicklung und Ausblick
  - Im abschließenden fünften Teil werden Rückschlüsse aus den erfolgten Messungen gezogen und durch Weiterentwicklungen der verwendeten Werkzeuge im digitalen Bereich der Prozesskette "Robotergestützte Einstellung der Adaptiven Schalung" und "Formatschleifen der Kontaktflächen", Möglichkeiten zu einer Optimierung aufgezeigt. Im Ausblick werden die im Rahmen dieser Erweiterung gewonnen Erkenntnisse und ihre möglichen Auswirkungen für eine neue Perspektive auf Entwurf und Design abgeleitet, in der die Information der Bearbeitung als gestaltendes Element der Fabrikation aber auch des Entwurfes genutzt werden kann und somit eine neuartige Wechselwirkung von Entwurf und Produktion ermöglicht.

## 1. Formenbau als wissenschaftliches Problem

# 1.1 Kontextualisierung im Architektonischen Diskurs und Methodik zur Lösung

#### **Einleitung**

Schalentragwerke: Schön, effizient...

Schalenbau im Beton: Diese intelligente Kombination von Material und Geometrie begeistert Architekten und Ingenieur gleichermaßen. Von Heinz Isler einst als das "leistungsfähigste Konstruktionsprinzip im stofflichen Universum" beschrieben¹ und von Jörg Schlaich als "genuinste Art, mit Beton zu bauen"², bringt sie diesen Baustoff seiner optimalen Ausnutzung und damit dem materialgerechtesten Einsatz besonders nah.

Tausende realisierte Projekte (allein Isler selbst zeichnet sich für über 1400 verantwortlich3), sowohl als Industrie- und Zweckbauten wie das Gartencenter Wyss (Schweiz, 1962, Abb. 1.1.1) aber auch repräsentative Bauten wie das Restaurante Los Manantiales (Xochimilco, Mexiko, 1958, Abb. 1.1.2) von Félix Candela und auch Projekte der Leuchtturmarchitektur wie der Palazzetto dello Sport (Abb. 1.1.3) 1957 von Pier Luigi Nervi, für die olympischen Spiele in Rom geplant und errichtet, stehen für die beispiellose Effizienz des Tragwerks. Bei Materialstärken von wenigen Zentimetern überspannen sie, in die richtige Form gebracht, mühelos 20 Meter und mehr stützenfrei. So spannt das von Isler geplante Tragwerk des Gartencenters in Wyss (Schweiz) 24 Meter von Auflager zu Auflager bei einer maximalen Materialstärke von 70 mm<sup>4</sup>, die vorfabrizierten, rautenförmigen Halbfertigteile des Palzetto dello Sport sind 2,5 cm dick5 und die vier sich im Zentrum treffenden 4cm starken Sattelflächen der HP-Schale Candelas überdachen über 30 Meter des mexikanischen Restaurants6.

Aber auch die geometrische Vielfältigkeit und Formenvarianz dieses Entwurfs-/Konstruktionsprinzips, und seine globale Verbreitung im zwei-



Abb. 1.1-1: Freiformschale, Gartencenter Wyss

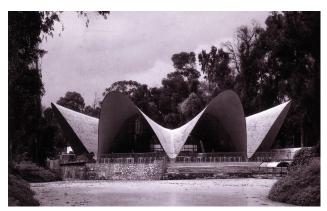


Abb. 1.1-2: HP-Schale, Restaurante Los Manantiales

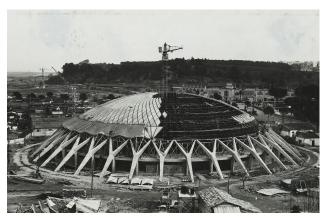


Abb. 1.1-3: Auflegen der vorfabrizierten 1680 baugleichen Ferrozement Rauten

<sup>1</sup> Isler, H. Moderner Schalenbau, in Arcus 18 (1992), 50-66, S. 50

<sup>2</sup> Schlaich, J. Rückblick und Ausschau auf das Berufsbild des Bauingenieurs: Ein Interview mit Jörg Schlaich aus dem Jahr 1999, in Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014), 838-849, hier 841

<sup>3</sup> Ramm, E. und Schnuck, E. "Heinz Isler Schalen", S. 10

<sup>4</sup> Chilton, J. "Heinz Isler, The Engineers Contribution to Contemporary Architecture" (2000),S. 73

<sup>5</sup> Faber, C. Candela und seine Schalen, Verlag Georg D.W. Callwey, 1965, München, S.204

<sup>6</sup> Nerdinger, W. Wendepunkt(e) im Bauen - Von der seriellen zur digitalen Architektur, DETAIL , 2010, München, S.112



Abb. 1.1-4: Kreative Vielfalt im Betonschalenbau, Krematorium in Japan, Toyo Ito & Associates, Architects



Abb. 1.1-5: Gebrauch von Beton in Platten und Balken

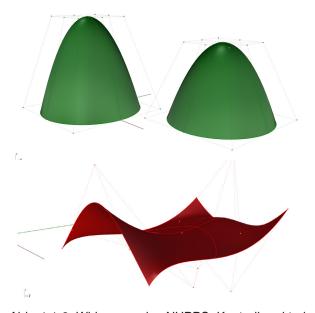


Abb. 1.1-6: Wirkungsweise NURBS, Kontrollpunkte beschreiben zwei Paraboloiden und eine Freiform

ten Drittel des 20. Jahrhunderts wird über diese drei Beispiele gut illustriert. Die kreative Bereicherung durch die Verwendung von digitalen Werkzeugen wird an den aktuellen Bauten, wie beispielsweise dem 2006 von Toyo Ito errichteten Krematorium (Abb. 1.1-4) ersichtlich.

#### ...aber nicht mehr gefragt

Und dennoch ist der Betonschalenbau drastisch zurückgegangen, ja aus dem aktuellen Bild der Architektur fast gänzlich verschwunden. Der alltägliche Einsatz von Beton findet in der materialverschwenderischen Form stark dimensionierten rechteckigen, weil einfach zu schalenden Bauteilen statt (Abb. 1.1-5). Polemisierte Isler selbst an dieser Stelle bewusst und stellte einen "Defekt in der menschlichen Erziehung"7 diesem Problem gegenüber, weisen andere Forscher in ihren Beiträgen vor allem auf die in Relation gestiegenen Kosten zur Herstellung der Schalungen hin. Beispielsweise reflektierte Jörg Schlaich in seinem eigenen Aufsatz "Haben Betonschalen noch eine Zukunft" im Interview mit der Deutschen Bauzeitung 1999 "..dass die Werkstoffe und Materialien zu billig sind und die Arbeit zu teuer ist, und dass wir demzufolge statt an Leichtigkeit und Effizienz zu denken, nur die Investitionskosten sehen. Die hohen Lohnkosten gehen zu Lasten der Ressourcen."8 Auch er bezeichnete den Umstand in diesem Zusammenhang als "Armutszeugnis für den Betonbau"9. Auch die Recherchen im Rahmen der Forschung zu adaptiven Schalungen der TU Delft, haben diesen Zusammenhang an einem ganz konkreten Beispiel festgemacht, und den Großteil der gebauten Schalen von Félix Candela, der in den 50er und 60er Jahren stattfand, den per Gesetz in Mexiko eingeführten Mindestlöhnen Ende der 60er gegenübergestellt10.

Die ökonomische Effizienz in Form der Arbeitsstunden der zum Erbau beteiligten Arbeiter kann nach heutigen Maßstäben aber nicht mehr das Hauptkriterium für die Entwicklung der zukünftigen Baustrategien sein. Mit 3.72 Mrd. Tonnen Zementverbrauch sind im Jahr 2012<sup>11</sup> also ca. 558 kg pro Kopf weltweit, dieses zur Herstellung

7 Isler, H. Moderner Schalenbau, in Arcus 18 (1992), 50-66, S. 50

8 Schlaich, J. Rückblick und Ausschau auf das Berufsbild des Bauingenieurs: Ein Interview mit Jörg Schlaich aus dem Jahr 1999, in Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014), 838-849, S. 841

9 Fbd 841

10 Michel, M., Knaack, U. Grundlagen zur Entwicklung adaptiver Schalungssysteme für frei geformte Betonschalen und Wände, in Bautechnik 91, 12 (2014), 845-853, S. 846

11 https://www.vdz-online.de/publikationen/betontechnische-berichte/ Zugriff: 12.09.2016

von Beton essentiellen Werkstoffs, verbraucht worden. Will dieser Wert reduziert werden, muss das Interesse für eine materialeffizientere Bauweise steigen.

#### Die Freiformen als Leuchtturmarchitektur

Hingegen erlebt das Interesse an Freiformen in der Architektur in den vergangenen 20 Jahren wieder eine Renaissance. Seit dem 1993 erschienen Manifest "Folding of Architecture" in dem Greg Lynn das Verlangen nach einer architektonischen Komplexität sowohl in der Komposition als auch in der Konstruktion proklamierte<sup>12</sup>, wurde der den entwurflichen Ansatz der Architekten und Designer verändernde Einfluss des Computer Aided Design deutlich. Nicht nur sorgen die verwendeten Programme dafür, dass Bauausführungszeichnungen immer schneller und umfangreicher erstellt und verwaltet werden können, die digitale Revolution hat unter Mithilfe der neuen Design-und Konstruktionsprogramme wie Rhinoceros© oder CATIA© und Animationssoftware wie Maya© die Formensprache entscheidend geprägt. Mathematische Prinzipien die in der Kraftfahrzeugindustrie zur Generierung von NURBS-Geometrien (NURBS -Non-Uniform-Rational-Beziér-Spline) entwickelt wurden, haben eine einfache Erstellung und exakte Beschreibung komplexer scheinbar regelloser, fließender Formen ermöglicht (Abb. 1.1-6).

Diese manifestierten sich zur Jahrtausendwende, in Form der sogenannten BLOB-Architektur (BLOB – Binary Large Object), einer Strömung die vor allem durch die Arbeiten Greg Lynns bekannt und beachtet wurde, der aber auch die Ferne zur Realität vorgeworfen wurde (Abb. 1.1-6 und -7)<sup>13</sup>.

Zuerst nur wenig gebaut, wurden solch freigeformte Architekturen, durch Werke wie das Kunsthaus in Graz (1999, Peter Cook, Collin Fournier und Bollinger+Grohmann Ingenieure, Abb. 1.1-9 und -10) bekannt, und verbreiten sich bis heute durch die Werk von Architekten wie Frank Gehry Partners, UN-Studio oder vor allem Zaha Hadid Architects weltweit.

Die Projekte dieser Größenordnung und Bedeutung sind allerdings starke Attraktoren für den Tourismus und werden so schnell zu neuen Wahrzeichen für eine gesamte Region. Niedrige Baukosten und eine effizienten Fertigung sind grundsätzlich zwar immer gewünscht,

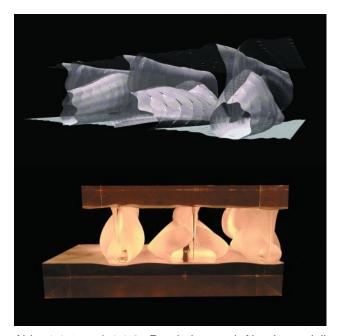


Abb. 1.1-7 und 1.1-8: Rendering und Abgabemodell (Greg Lynn Form, Erweiterung St. Gallen Kunstmuseum, 2001) Animation nicht umgesetzter BLOB-Architektur



Abb. 1.1-9: Kunsthaus in Graz, Landmark und gebaute Ikone der BLOB-Architektur



Abb. 1.1-10: Die komplexe Formensprache wird durch eine Vielzahl (ca. 1300) individuell gefertigter, warmverformter Acrylglasplatten ermöglicht

<sup>12</sup> Lynn, G. Folding in Architecture (2004), S. 8

<sup>13</sup> Flagge, I. in BLOBMEISTER - erste gebaute projekte (2001), S.6



Abb. 1.1-11: Sichtbetonfassade des Roca Pavillon





Abb. 1.1-12 bis 1.1-15: Geometrisch komplexe und stark unterschiedliche Schalungen und Bauteile

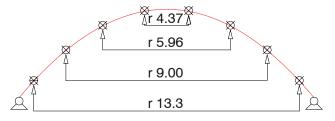


Abb. 1.1-16: Kontinuierliche, spiegelsymmetrische Änderung des Krümmungsradius einer Parabel

aber gerade bei den von diesen Architekten geplanten Leuchtturmprojekten kaum essenzieller Bestandteil der Entscheidungsfindung für oder gegen ein Projekt. Die ca. 1300 doppelt gekrümmten Acrylglasplatten, für die fast ebenso viele Formen hergestellt wurden<sup>14</sup> sind nur ein Beispiel in diesem Kontext. Selbst wenn von den ausführenden Firmen die Umsetzbarkeit angezweifelt<sup>15</sup> wird, wie bei der der Herstellung der stark doppelt gekrümmten glasfaserverstärkten Betonbauteile bei der Realisierung der "Roca London Gallery" von Zaha Hadid Architects und Büro Happold, wird zur Herstellung jedes einzelnen der 90 unterschiedlich geformten Faserbeton-Elemente nicht nur ein eigenes Formwerkzeug gefräst<sup>16</sup> (Abb. 1.1-12 bis -15), sondern auch der verwendete Beton modifiziert und ein spezielles Schalungsöl entwickelt, um die hohen Qualitätsansprüche zu gewährleisten. Aktuelles Beispiel für die Bereitschaft bei solchen Leuchtturmprojekten, die Kosten in den Hintergrund zu stellen, zeigt die Baukostenentwicklung zur Errichtung des Elbphilharmonie in Hamburg, von damals geschätzten 77 Millionen Euro auf aktuell 789 Millionen Euro<sup>17</sup>, die einer Fertigstellung dennoch nicht im Wege stand.

Es lässt sich schlussfolgern, dass die Fertigung selbst komplexester Architekturen, die aus einer Vielzahl unterschiedlicher doppeltgekrümmter Bauteile bestehen, nach dem Stand der Technik möglich ist, aber in der Regel nach wie vor unverhältnismäßig hohen Kosten- aber vor allem Ressourcenverbrauch zur Folge hat, und auf wenige Projekte reduziert bleibt. Dennoch dokumentieren die Anstrengungen die hinter diesen Aufwänden stecken das nach wie vor anhaltende Interesse an einer Formenvielfalt, die häufig mit doppelter Krümmung einhergeht.

Schalen und Freiformen vom Standpunkt der Fabrikation

Betrachtet man Freiform und Schalengeometrie vom Standpunkt der Fabrikation aus, unterscheiden sie sich nur unwesentlich voneinander. Vereinfacht dargestellt illustriert die Seillinie diese Verwandtschaft. Die sich unter Eigenlast einstellende Geometrie ist die Kathenoide, eine Kurve deren Krümmungsradius sich leicht anders, aber genauso kontinuierlich ändert, wie die

<sup>14</sup> http://www.ktec.at/pdf/Kunsthaus\_Graz\_12.pdf, Zugriff: 20.09.2016

<sup>15</sup> http://concrete-composite.cetongrc.com/wp-content/uploads/2013/06/WWW-2.11 Roca 2111 3.pdf, 10.09.2016

<sup>16</sup>http://www.baunetzwissen.de/objektartikel/Beton-Roca-London-Gallery-in-London-GB\_2517847.html, Zugriff 10.09.2016

<sup>17</sup> http://www.ndr.de/nachrichten/dossiers/elbphilharmonie/Elbphilharmonie-soll-789-Millionen-Euro-kosten,elbphilharmonie821.html Zugriff 10.09.2016

unter einer Gleichstreckenlast auftretende Parabel (Abb. 1.1-16). Unterteilt man diese Kurven in Segmente, ist jeder Abschnitt unterschiedlich gekrümmt. Nur die Spiegel- oder dann bei der Betrachtung von Flächen auftretenden Rotationssymmetrien führen zu einer Wiederholung der identen Geometrie und ließen daher eine Mehrfachverwendung eines baugleichen Formenwerkzeugs zu (Abb. 1.1-17).

An das Ziel der Arbeit, einen Beitrag für die Entwicklung eines adaptiven Werkzeugs zur Herstellung von Schalen wie Freiformen zu leisten, werden also grundsätzlich gleiche Anforderungen gestellt.

#### Stand der Technik im Schalungsbau

Nach dem derzeitigen Stand der Technik ist das üblicherweise im Schalungsbau meistverwendete Schalungsmaterial nach wie vor Holz<sup>18</sup>. Dabei handelt es sich vorwiegend um speziell geschichtet und beschichtet Werkstoffplatten die für eine hohe Sichtbetonqualität und Mehrfachverwendung ausgelegt sind. Bei großen Stückzahlen baugleicher Elemente werden verstärkt Kunststoff- und Metallschalungen eingesetzt, da sie eine deutlich höhere Standzeit aufweisen und sich die Mehrkosten der Herstellung amortisieren.

Die in der Fragestellung geforderten doppelt gekrümmten Bauteile in kleinen Losgrößen sind dem Sonderformenbau zuzuordnen. State of the Art sind hier nach wie vor subtraktive Herstellungsprozesse in Form von CNC-Fräsen, meist diverser Schäume wie XPS, EPS oder hochwertigeren PU-Schäumen, seltener auch Holzwerkstoffe wie MDF.

Diese Technik, die in der jüngeren Geschichte die digital kontrollierte Herstellung der Fassadenschalung des Neuen Zollhofs in Düsseldorf (1999, Frank Gehry + Partner) ermöglichte<sup>19</sup> (Abb. 1.1-18 und -19), oder 2014 zur Realisierung des ROCCA-Pavillon von Zaha Hadid beitrug, ist selbst für aktuelle Forschungsbeispiele noch Orientierungspunkt. Und dies obwohl sie nur einige Teilaspekten einer ressourceneffizienten Fertigung abbildet.

Auch das erst 2014 abgeschlossene Forschungsprojekt "TailorCrete" welches das erklärte Ziel hatte, den "..kosten- und arbeitseffizienten Prozess zur Herstellung von divergenten Strukturen" zu ermöglichen<sup>20</sup>, griff auch noch

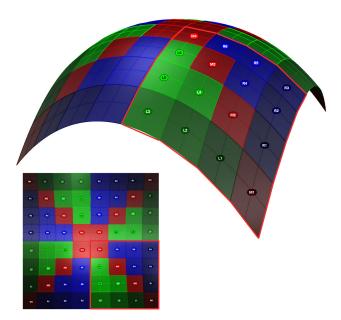


Abb. 1.1-17: Spiegelsymmetrische Schale, 4x16 (gesamt 64) Elemente bilden die Schale ab (rot abgesetzt)



Abb. 1.1-18 und -19: Herstellung einer Schalung mittels Fräsen für die Fassade des *Neuen Zollhofs* (1999)



Abb. 1.1-20: Herstellung einer Schalung mittels Fräsen im Forschungsprojekt *TailorCrete* (2014)

<sup>18</sup> Peck, M. Baubetrieb des Betons, in Moderner Betonbau (2013), 46-54, S. 50

<sup>19</sup> Wallisser, T. Digitale Entwurfs- und Fabrikationsmethoden, in Moderner Betonbau (2013), 106-113, S. 110

<sup>20</sup> http://www.detail.de/artikel/massgeschneiderte-freiform-forschungsprojekt-tailorcrete-13453/ Zugriff 10.9.2016

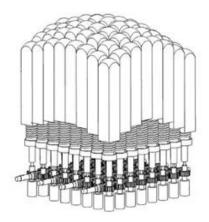


Abb. 1.1-21: Abstandsloses Feld von Stempeln ohne Schalhaut (2011, Li M.)

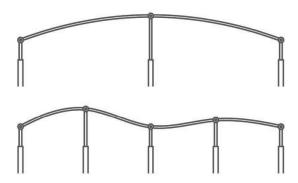


Abb. 1.1-22: Steife Schalhaut zur Uberbrückung der Lücken im Schal (2012, Raun C. und Kirkegaard)

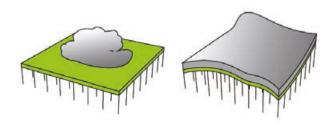


Abb. 1.1-23: Betonage direkt auf die Adaptive Form (2012, Raun C. und Kirkegaard)

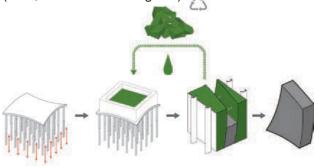


Abb. 1.1-24: Abnahme eines Formstoffes zur Verwendung als Vorortschalung (2012 Oesterle S. und andere)

auf diese Methode zurück (Abb. 1.1-20).

Die Materialeffizienz im Beton, die durch die Erstellung von doppelt gekrümmten Geometrien erreicht werden kann, wird bei der Herstellung der Schalungsformen mittels robotergestütztem Fräsen, mit einer Ressourcenverschwendung im Schalungsbau erkauft. Soll dieser Aspekt auch mit abgedeckt werden, ist die direkte Betonage auf eine wiederverwendbare adaptive Schalung, oder zumindest Verwendung eines voll recyclingfähigen Formstoffes notwendig.

Fabrikationsstrategien mit adaptiven Schalungen Das Konzept adaptiver Schalungen ist seit über 140 Jahren fortwährender Bestandteil der Forschungsbemühungen und beschäftigt nicht nur die Architektur, sondern auch beispielsweise im Karosserie- und Flugzeugbau die Wissenschaft und Wirtschaft gleichermaßen<sup>21</sup>. Dennoch hatte es bis zum Jahr 2003 noch kaum eines der vielen Konzepte, unabhängig von Material oder Einsatzgebiet, in eine wirtschaftliche Anwendung geschafft<sup>22</sup>.

Das gerade im Kontext des Betonschalenbaus aufscheinende, hohe Potential, dieses im Verarbeitungsprozess fluide und somit einfach in Form zu bringende Material, intelligent und effizient zu nutzen und es eleganten, logischen und effektiven Geometrien zuzuführen, wurde besonders in den vergangenen Jahren wieder stark postuliert und hat zu einigen neu präsentierten Konzepten adaptiver Schalungsapparaturen im architektonischen Forschungsraum geführt.

Die gewählten Strategien ähneln sich dabei grundsätzlich sehr: Eine digital erzeugte Fläche wird in Abschnitte, welche den Abmessungen des Schalungskonzeptes entsprechen unterteilt. Das Feld besteht aus in einem Raster angeordneten Stempeln, die durch ein Verfahren dieser in der Z-Achse die gewünschte Geometrie. Abstraktions- und Genauigkeitsgrad hängen hierbei zum einen von einer Kombination aus der Auflösung des Stempelfeldes und dem Abstand der Stempel zueinander ab, und zum anderen von der Steifigkeit und Elastizität der im System verwendeten Schalhaut (Abb. 1.1-21 und -22). Es wird entweder auf die Schalung direkt betoniert, oder über einen Formstoff die eine zur Betonage verwendete Schalform abgenommen (Abb. 1.1-23 und -24).

21 Amtsberg, F, Parmann, G. Trummer, A. und Peters, S. *From Analysis to Production and Back*, in Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016 (2016), 304-315, S. 306

22 Munro, C. and Walczyk, D. Reconfigurable pin-type tooling: a survey of prior art and reduction to practice, in Journal of manufacturing science and engineering 129.3 (2007): 551-565, S.558

Die verschiedenen Studien (auf die konkreten Beispiele anderer forschender Institutionen wird im Kapitel 2.2 noch genauer eingegangen) markieren den aktuellen Stand der Forschung im Schalungsbau und legen die Grundlage für die eigenen Forschungsbemühungen.

Der Industrieroboter im Zentrum der Fertigung Der Einsatz von computergesteuerten Fabrikationsmedien hat sich im Forschungsfeld der Architektur etabliert, und somit der entmaterialisierenden<sup>23</sup> Wirkung der digital entworfenen Freiform-Architektur eine Entwurfsphilosophie gegenübergestellt, in dessen Rahmen das wohl versatilste Werkzeug der industriellen Fertigung, der 6-Achs Industrieroboter und das essentielle Planungs- und mittlerweile auch Entwurfswerkzeug der Architektur, der Computer direkt miteinander verknüpft wurden (Abb. 1.1-25).

Eine entscheidende Wende in diesem Prozess wurde durch die Entwicklung von einfacher zugänglicherer Software (insbesondere sie hier der grafische Algorithmen Generator Grasshopper© ein Plugin für Rhinoceros© genannt) ermöglicht. Graphische Programmieroberflächen ermöglichten das schnelle und relativ einfache Erlernen von vorher Programmierern vorbehaltenden Arbeitsschritten, und machten zum einen das regelbasiert also parametrische Entwerfen zugänglich. Sie verknüpften die digitale Welt mittels neu erschaffener Schnittstellen mit der physischen Realisierung, indem sie computergesteuerte Fertigungsmaschinen, des Rapid-

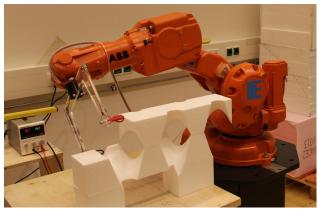


Abb. 1.1-25: Einsatz eines Industrieroboters im Rahmen des Workshops *Heat to Fit*, ITE TU Graz, ABK Stuttgart, ROK Office, 2013)

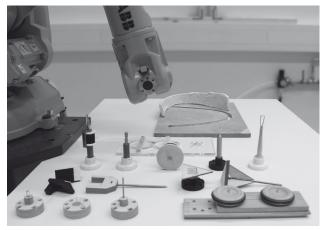


Abb. 1.1-26: Simple Werkzeuge im Mittelpunkt des arch. Designs (Masterstudio *Faksimile* - Herstellung doppelt gekrümmter Betonbauteile, TU Graz, 2013)

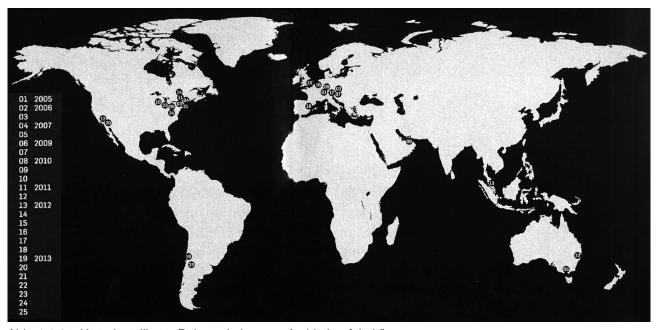


Abb. 1.1-27: Karte installierter Roboter-Labore an Architekturfakultäten

23 Gramazio, F. Kohler, M. Willmann, J. The Robotic Touch (2013), S. 9



Abb. 1.1-28: Auf eine Anwendung (Beton glätten) spezialisierte Roboter der Firma Kajima



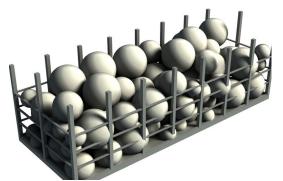




Abb. 1.1-29-31: Die Freiheiten der robotischen Fertigung als kreativer Impuls, Weingut Gantenbein, 2006

Prototyping (Lasercutter und 3d-Drucker), aber vor allem auch der Bauteilproduktion (CNC-Fräsen und mittlerweile auch die Fertigungsroboter) direkt ansteuerbar machten. Während einige Forschungsinstitutionen eigene Programme entwickelten, ist mit hal© ein Postprozessor auf Basis eines Grasshopper© Plugins entstanden, dessen weltweite Nutzergruppe zu großen Teilen aus Architekten und Designern besteht<sup>24</sup>.

In der letzten Dekade hat so eine erneute Auseinandersetzung mit der Robotik im Bauwesen begonnen, die Fertigungsmaschinen als entwurfsgenerierende Werkzeuge betrachtet und einsetzt. Der Ursprung dieser Ausrichtung, die eine Auseinandersetzung mit Werkstoff, Werkzeug und Fertigung in den Mittelpunkt stellt (Abb. 1.1-26).

Diese sich bis heute ausweitende Strömung, die sich vor allem an der fortwährenden Installation architektonischer Forschungslabore zum Thema Robotik (Abb. 1.1-27) und deren publizierten Konferenzbeiträgen und Forschungspavillons kenntlich macht, unterscheidet sich in ihrem Konzept deutlich von den schon 30 Jahre zuvor initiierten Onsite-Fabrikationskonzepten, die vorwiegend in Japan ihren Ursprung und auch ihren Zenit hatten<sup>25</sup>.

War es dort die Verwendung spezialisierter und autark arbeitender Fertigungsmaschinen (Abb. 1.1-28), die das Ziel hatten eine vollautomatisierte quasi menschenfreie Baustelle zu etablieren<sup>26</sup>, steht in den aktuellen Bemühungen meist der kreative Impuls, den die versatile Verwendung des Industrieroboters, als generisches Werkzeug ermöglicht, im Fokus.

Besonders deutlich wird diese Haltung an dem bereits 2005 installierten Lehrstuhl für Architektur und Digitale Fabrikation der ETH Zürich von Fabio Gramazio und Matthias Kohler. Die sich auf den "additiven Aufbau von architektonischen Elementen" fokussierenden Forschung wird durch den ältesten und wohl bekanntesten Beitrag deutlich. Die Fassade des Weingut Gantenbeins, die ein 3d-Rendering eines Weinkorbes dadurch abbildet, dass die Grauwerte eines jeden Pixels des Bildes durch einen rotiert platzierten Backstein abgebildet werden<sup>28</sup>, ist vom

<sup>24</sup> http://www.hal-robotics.com/ Zugriff 20.09.2016

<sup>25</sup> Bechthold, M. *The return of the future: a second go at robotic construction* in Architectural Design 80.4 (2010): 116-121. S.119 26 Ebd. 119

<sup>27</sup> http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/index.html Zugriff 10.09.2016

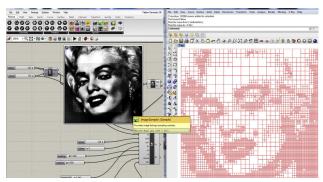
<sup>28</sup> Gramazio, F. and Kohler, M. Digital materiality in architecture, Baden: Lars Müller Publishers, 2008 S. 95

traditionellen Handwerk kaum noch herstellbar, und repräsentiert die Verbindung eines parametrischen Entwurfs und seiner individuellen digital ermöglichten Herstellung wie kaum ein zweites Projekt (Abb. 1.1-29 bis -31).

Die Ma+PS Group (Material Processes and Systems Group @ Harvard GSD, früher Design Robotics Group, Leitung Prof. Martin Bechthold) untersucht unter anderem seit Jahren kontinuierlich den Werkstoff Keramik, auf unentdeckte Potentiale, die vor allem im Rahmen der neu etablierten Fabrikationssysteme, wie eben Industrieroboter aufscheinen und eine neuartige Nutzbarkeit im architektonischen Kontext ermöglichen. So wurden Fliesen unterschiedlicher Standardformate durch robotische Pic and Place Strategien zur Erstellung detaillierter Grafiken verwendet<sup>29</sup> (Abb. 1.1-32 bis -36), oder adaptive Schalungen mit Hilfe des gleichen Roboters eingestellt und dann mittels Extrusion des Materials auf dieser Schalung, doppelt gekrümmte Fliesen hergestellt30.

Das Institut für Computational Design (Prof. Achim Menges) und Institut für Tragkonstruktion und Konstruktives Entwerfen (Prof. Jan Knippers) der Universität Stuttgart haben kollaborativ das Material Holz und hier vor allem die geometrischen Freiheiten und Grenzen von Fingerzinkenverbindung zur Herstellung von Holzleichtbaukonstruktionen untersucht<sup>32</sup> und in immer neuen Pavillons unter verschiedenen Konfigurationen und Nutzungen dieser Verbindung praktisch demonstriert (Abb. 1.1-36 und -37).

Bei den Entwicklungen des Instituts für Tragwerksentwurf steht auch bei den Beiträgen zur digitalen Fabrikation die Entwicklung von ressourceneffizienten Tragwerken im Zentrum der Forschung. So zielt sowohl die subtraktive Bearbeitung des RobArch-Bogens<sup>32</sup>, als auch das im Rahmen dieser Arbeit präsentierte Konzept der adaptiven Schalung, so wie das aktuelle Forschungsprojekt "COEBRO" auf materialreduzierenden Einsatz und digital generierten Leichtbau.



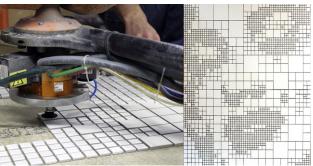


Abb. 1.1-32-35: Unterteilung eines Bildes in unterschiedlich große Fliesen und die robotische Umsetzung via Pic and Place

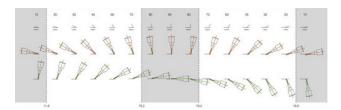


Abb. 1.1-36: Darstellung der geometrischen Freiheiten(weiß) und Grenzen (grau) des robotischen Fräsens von Fingerzinken



Abb. 1.1-38: Umsetzung in Form des aus Sperholzplatten geferigten ICD/IITKE Summer Pavillons 2012

29 King, Nathan, et al. *Robotic tile placement: Tools, techniques and feasibility*, in Automation in Construction 39 (2014): 161-166 S.163 30 Bechthold, M. and King, N. *Design robotics* in Rob| Arch 2012. Springer Vienna, 2013. 118-130. S. 128

31 Krieg, Oliver, et al. *Performative Architectural Morphology Finger-Joined Plate Structures Integrating Robotic Manufacturing,* in Computational Design Modelling. Springer Berlin Heidelberg, 2011. 259-266. S.261

32 Trummer, Andreas, Felix Amtsberg, and Stefan Peters. "Mill to Fit." Rob| Arch 2012. Springer Vienna, 2013. 110-117. S. 110

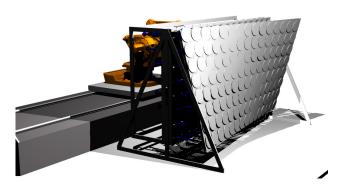


Abb. 1.1-38: Erstes Rendering des Konzeptes einer vom Roboter ansteuerbaren Schalung, ITE (Januar 2011)

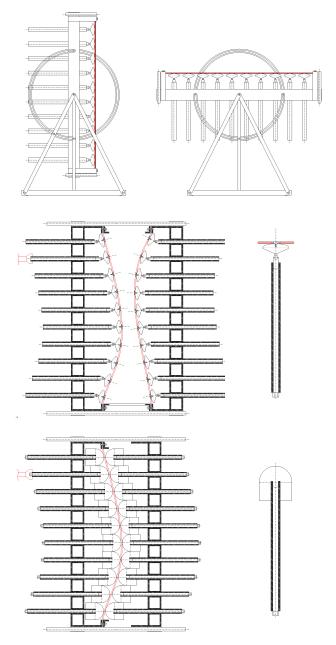


Abb. 1.1-39: Konzepte erster Varianten der vom Roboter ansteuerbaren Schalung, ITE (Januar 2012)

33 Peters, Stefan et al. "Schalentragwerke aus UHPC-Fertigteilen".

#### Fazit

Ob Materialuntersuchungen (Keramik), Verbindungstypologien (Fingerzinken), Innovative Verfahrenstechniken (Pic and Place) oder die übergeordnete Struktur (Tragwerk). Die Implementierung der, üblicherweise in der Ausführung verwendeten und somit am Ende der digitalen Prozesskette stehenden Fabrikationsmedien, hat digital und real, Konzept und Bauwerk, erste Idee und letzten Ausführungsschritt wieder enger miteinander verknüpft.

Die Loslösung von der Materialität des Bauens, und die Lücke zwischen Entwurf und Umsetzung des durch das Design im virtuellen Raum neu ermöglicht wurde, kann mittels dieses Ansatzes wieder geschlossen werden, ohne die gewonnen Freiheiten der digitalen Architektur einzubüßen.

Ableitung zur Lösungsstrategie des Forschungsprojektes 836524 "Schalentragwerke aus UHPC" Die Erweiterung der digitalen Prozesskette in die Fertigung, ermöglicht durch den versatilen Einsatz von Industrierobotern, die Lösung einer, trotz vielversprechender Lösungsansätze, nach wie vor nur unzureichend gelösten Aufgabenstellung: Die ressourcensparende Herstellung von leistungsfähigen Beton-Freiformelementen. Sie kann durch die Ausstattung mit einem Industrieroboter auch von kleinen und mittelständischen Betrieben kosteneffektiv ermöglicht werden. Dabei können sämtliche digital kontrollierten Fertigungsschritte von ein und demselben Roboter übernommen werden; gewechselt werden nur die Werkzeuge.

Der Stand der Technik, nach wie vor der subtraktive Herstellungsprozess durch das Schneiden oder Fräsen diverser Schäume, wird durch einen vom Industrieroboter ansteuerbaren und somit robusten adaptiven und wiederverwendbaren Formtisch ersetzt. Die robotische Fertigung der Bauteile im Werk bedingt die detaillierte Auseinandersetzung mit einer adäquaten Fügemethode.

Die Fügetechnik, die bei der Herstellung von vorfabrizierten Halbfertigteilen üblicherweise durch Verkleben oder Vergießen also "nass" ausgeführt wird, wird durch eine "trockene Fuge" substituiert. Dazu wird die Kontaktfläche der Bauteile mittels Nassschleifens hochpräzise gefertigt, und anschließend über ein integriertes Verschraubungssystem gefügt<sup>33</sup>.



Abb. 1.1-40: Flussdiagramm vom Entwurf zur Fertigung - FFG-Projekt Schalentragwerke aus UHPC

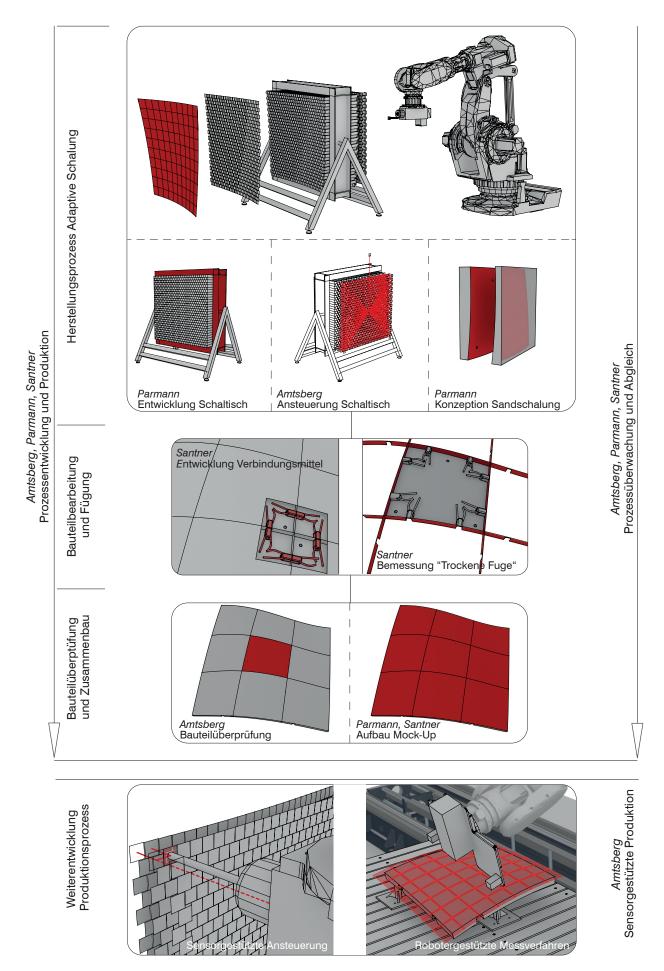


Abb. 1.2-1: Abgrenzung der Dissertationen im gemeinsamen Forschungsprojekt

## 1. Formenbau als wissenschaftliches Problem

## 1.2 Abgrenzung der Forschungsarbeiten

#### Drei Forschungsschwerpunkte

Drei Forschungsschwerpunkte, die in Dissertationen ausgearbeitet wurden, haben dieses Forschungsprojekt mit ihren unterschiedlichen Vertiefungsrichtungen begleitet. Die Arbeit von Gerhard Santner (Labor für Konstruktiven Ingenieurbau) hat sich mit der Dissertation "Fügetechnik im UHPC-Schalenbau" mit der experimentellen und analytischen Modellierung eines schraubbaren Verbindugssystems, das die auftretenden Biegemomente und Querkräfte mittels Vorspannen aufnehmen kann, auseinandergesetzt. Gernot Parmann (Institut für Tragwerksentwurf) hat sich unter dem Titel "Adaptive Schalungstechnik zur Herstellung doppelt gekrümmten Betonbauteile (Arbeitstitel)" mit der Entwicklung und Konstruktion des Herstellungskonzeptes auseinandergesetzt. Dies beinhaltet die Entwicklung des schlussendlich verwendeten Schalungssystems "Pixeltisch" und die Ausformulierung eines Abnahmesystems, der "Formsandschalung".

Der Fokus der hier präsentierten Arbeit liegt auf der Schnittstelle von Digital zu Real, also in der Entwicklung und Überwachung von Umsetzungs-/ Produktionsstrategien am Computer generierter Freiformen und der kontrollierten Ausführung durch CAM-Technologie in diesem Fall 6-Achs Industrieroboter.

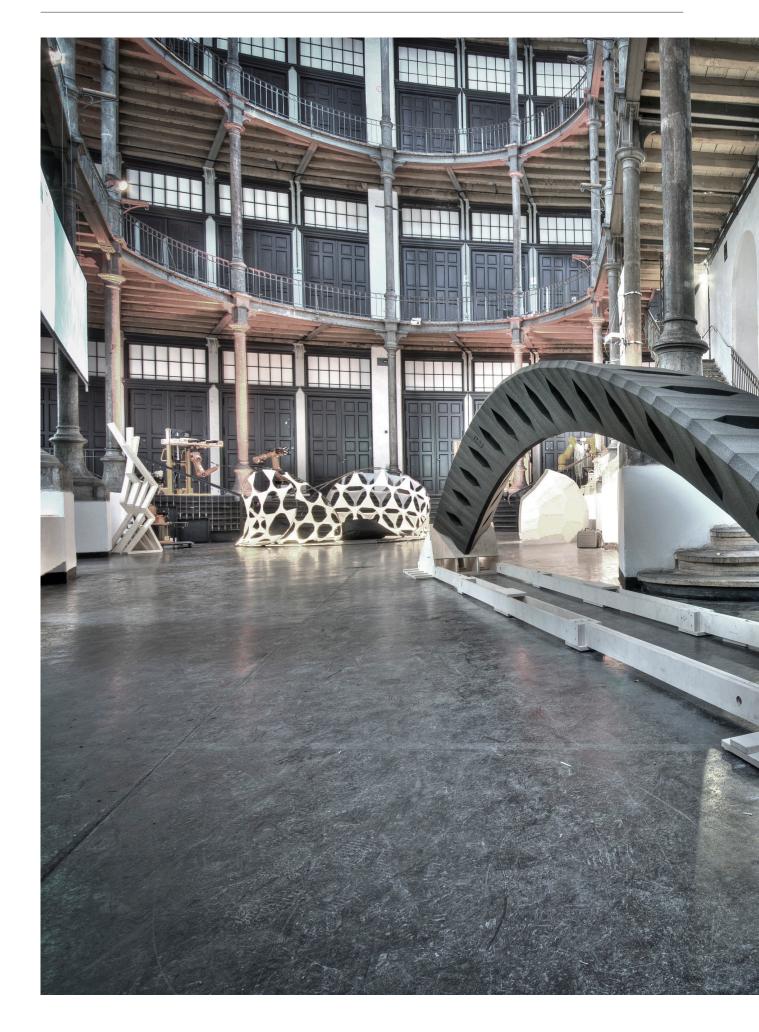
Darauf ausgerichtet, beinhaltet diese Arbeit die Entwicklung von passenden Werkzeugen und der Erstellung und Adaption der notwendigen Maschinenbahnen (CAM) zur Einstellung der Schalung, Des Weiteren erfolgte eine detaillierte Vermessung aller ausgeführten Arbeitsschritte, darauf beziehend eine Ermittlung der durchschnittlichen Abweichungen in der Herstellungsprozesskette und eine Erforschung der Ursachen.

Dazu wurden die Werkzeuge und Bauteile nach folgenden Arbeitsschritte untersucht:

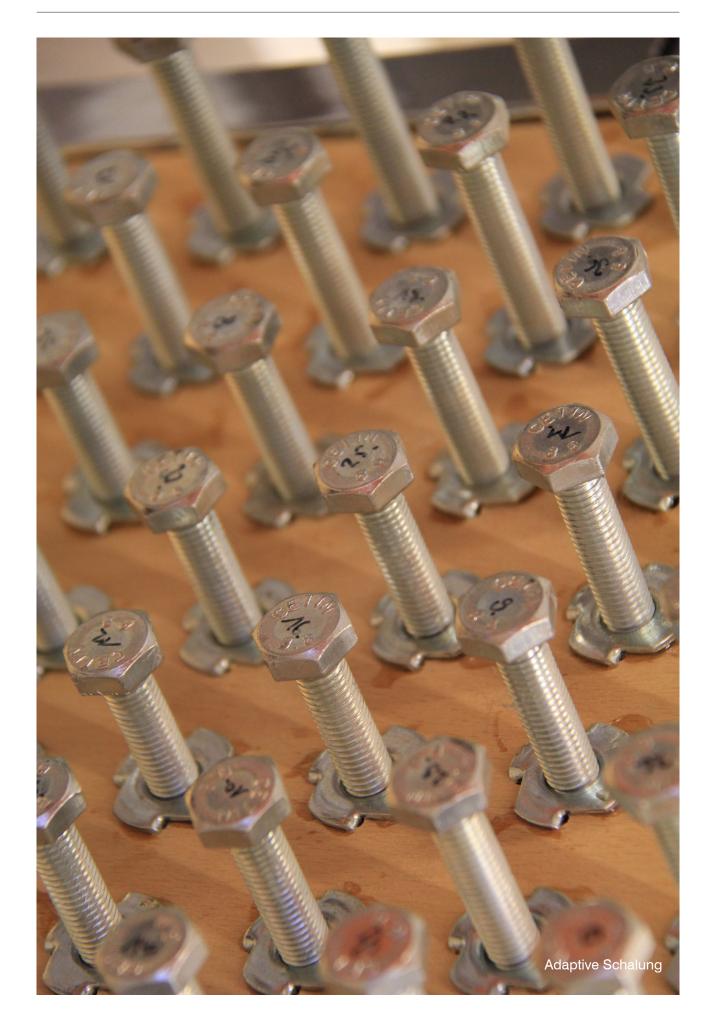
- Eingestelltes Pixelfeld
- Fertigungsgenauigkeit der verwendeten Schalhäute
- Übertragungsgenauigkeit Pixelfeld auf Sandform 3p
- Übertragungsgenauigkeit Sandform 3p auf Sandform Offset
- Fertigungsgenauigkeit der Sichtflächen der Bauteile
- Fertigungsgenauigkeit der Kontaktflächen der Bauteile
- Übertragung der Abweichungen im verbauten Zustand des Mock-Ups

Im letzten Teil der Arbeit wird eine Weiterentwicklung der Fabrikation behandelt und durch die Entwicklung eines sensorgestützten Einstellungsprozesses prototypisch umgesetzt. Des Weiteren wird die Weiterentwicklung des subtraktiven Bearbeitungsschritts der Kontaktflächen durch hochauflösende robotergestützte zyklische Erfassung der Arbeitsgänge postuliert und exemplarisch dargestellt.

Ausblickend wird das Potential der sensorgestützten Fabrikation und ihre Nutzbarmachung, nicht nur in der Prozessoptimierung sondern auch in der Designentwicklung beurteilt und eine Einordnung im architektonischen Kontext vorgenommen.







## 2. Vorstudien

## 2.1 Adaptive Schalungen

#### Grundlagen zu Schalungsstrategien

Die effiziente Produktion von Betonschalen ist schon seit langer Zeit ein vielbeachtetes Feld in der architektonischen Forschung. Diese werden zur Einordnung in dieser Arbeit in zwei unterschiedliche Ansätze unterteilt: Zum einen, die komplette Produktion Vorort aus Ortbeton, und zum anderen die Fügung von industriell vorfabrizierten Fertig- und Halbfertigteilen.

#### Vorort

Das häufigste für eine Betonage Vorort verwendete Material ist nach wie vor Holz<sup>34</sup>. Einfach zu verarbeiten, flexibel und wenn richtig behandelt und verarbeitet auch mehrfach einsetzbar, sind Holzschalungen Vorort aber auch im Werk, das vorherrschende Material. Dabei ist es keineswegs auf den Einsatz in flachen oder einsinnig gekrümmten Bauteilen reduziert. Viele der Schalen Islers und Candelas wurden auf Holzgerüsten errichtet (Abb. 2.1-1). Isler selbst hat diese sogar für seine Schalenentwürfe mitentwickelt<sup>35</sup> Die kunstvolle Bandbreite und vielfältige Formensprache, die durch komplexe Zuschnittsmuster und clevere geometrische Konzepte möglich ist, zeigt sich beispielsweise in der Realisierung der fließenden Raumgestaltung des TWA Terminals in New York von Eero Saarinen (Abb. 2.1-2, USA, 1962). Rein aus Brettschalungen hergestellt, wurden die komplexen Geometrien fast ausschließlich aus Regelflächen entwickelt<sup>36</sup>, die kleinteilig segmentiert von geraden Schalbrettern hergestellt werden konnten (Abb. 2.1-3).

Diese Grenzen sprengt der sogenannte "Twist" also jene Betonstruktur, die als Ebenen verbindendes Elemente in mehrfach gestapelter Ausführung das Konzept einer Doppelhelix in das Innenraumkonzept des Mercedes Benz Museums in Stuttgart (Deutschland, 2006) materialisiert hat. Zur Herstellung der Schalung, waren die prä-digitalen Mittel der Planung nicht mehr ausreichend. So wurde ein Konzept zur Her-



Abb. 2.1-1: Holzschalung beim Bau des von Félix Candela geplanten Ozeaneums in Valencia 2003



Abb. 2.1-2: Fließenden Formen bilden den gesamten Inneraum des TWA-Terminals

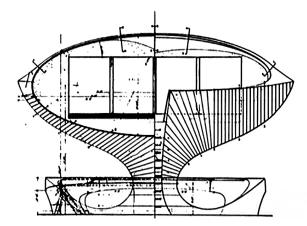


Abb. 2.1-3: Schalplan zur Herstellung der Anzeige aus geraden Holzbrettern

34 Peck, M. Atlas Moderner Betonbau, Konstruktion, Material, Nachhaltigkeit. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation (2013). S. 46

35 Pius F. Die Suche nach der perfekten Schale. In: tec21, 49-50/200238, (2002) S. 15

36 Wallisser, T. Atlas Moderner Betonbau, Konstruktion, Material, Nachhaltigkeit. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation (2013). S. 109

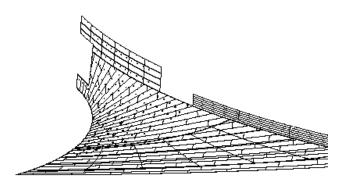


Abb. 2.1-4: Schalplan der Unterseite des Twists auf Basis des 3d-Modells..



Abb. 2.1-5: ..und Verlegeung der Schalplatten Vorort



Abb. 2.1-6: Textile Schalung zur Herstellung einer HP-Schale



Abb. 2.1-7: Auf textiler Schalung hergestellte HP-Schale

stellung doppelt gekrümmter aus einer Vielzahl während des Zuschnitts flachen, zusammengebaut aber gekrümmten Platten (Abb. 2.1-4 und -5) ermöglichte<sup>37</sup>.

Und auch die jüngst hergestellte mehrere tausend m² große Schalung zur Herstellung der schalenartigen Bodenplatte des EPFL-Learning Centers in Lausanne (Schweiz, 2008), besteht aus Holz in Form von 1458 OSB-Schalkörpern, die auf einem Lehrgerüst ausgerichtet und zur Vortortbetonage genutzt wurden. Die Zuschnittpläne zur Herstellung der Schalkörper und Fertigung der Bauteile erfolgte komplett digital und automatisiert³³.

Somit bieten Holzschalungen eine Kombination aus einfacher Verarbeitung, günstigen Materialpreis und versatilem Einsatz, die sie sowohl zur Herstellung von einmalig verwendeten Freiformen, als auch im Mehrfachgebrauch als eine effiziente Lösung erscheinen lassen.

Textile Schalungen, pneumatische Schalung Das wohl bisher variantenreichste Alternativkonzept zur Holzschalung, ist die Verwendung von textilen Schalungen, bei dem textile Bahnen in Kombination mit möglichst aufwandsarm herzustellenden Stützprinzipien genutzt werden. Hier kann wieder in zwei grundsätzlich unterschiedliche Ansätze der Formgebung unterteilt werden. Beim ersten Verfahren stellt sich die endgültige Form aufgrund des Einbringens des Betons ein. Dazu wird eine Schalhaut zugeschnitten und an verschiedenen Bereichen durch externe Unterstützung oder interne Verbindung (beispielsweise das Vernähen, Verkleben oder Verschweißen des Materials) manipuliert. Die flexible Schalung bleibt in den durch die Manipulierung fixierten Bereichen in einer definierten Position, und wölbt sich in den freien Bereichen in Folge des Betondrucks auf. Dieses Verfahren, das von Gustav Lilienthal nachweislich systemisch eingesetzt wurde<sup>39</sup> und zu dessen Verbreitung und wissenschaftlicher Untersuchung vor allem Mark West mit seinen Experimenten beigetragen hat, zeigt sein Potential vor allem in der Verwendung von Geometrien, die sich das Eigengewicht des verwendeten Betons zunutze machen können: Stützen, Träger und in jungen Forschungen der Block Research Group auch HP-Schalen (Abb. 2.1-6 und -7)40.

37 Wallisser, T. Atlas Moderner Betonbau, Konstruktion, Material, Nachhaltigkeit. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation (2013). S. 110

38 http://www.design2production.ch/ Zugriff: 26.10.2016

39 Veenendaal, D, and Block, P. Zwischen effizienter Konstruktion und expressivem Ausdruck, in Archithese 3 (2013): 38-43. S. 38 40 Veenendaal, D. and Block, P. Design process for prototype concrete shells using a hybrid cable-net and fabric formwork in PEngineering Structures (2014): 39-50. S. 39

Das für den Schalenbau bedeutungsvollere Verfahren ist das der pneumatischen Schalung, zu der von Walace Neff 1942 das erste Patent eingereicht worden ist<sup>41</sup>. Bei dieser Technik wird eine speziell zugeschnittene Membran durch ein stützendes Medium (in der Regel Luft) unter Überdruck gesetzt und somit in Form gebracht. Je nach Verfahren gestaltet sich das Auf- oder Einbringen des Betons sehr unterschiedlich. Bei dem von Neff patentierten Verfahren wird der Beton torkretiert, also auf die Schalung und die Bewehrung aufgespritzt<sup>42</sup>. Je nach System kann die Membran nach dem Aushärten des Betons sofort wiederverwendet werden oder verbleibt "zur Erhöhung der Wasserdichtigkeit"43 auf der Schale.

Bei dem in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelten Verfahren von Dante Bini, wird der Beton aufgebracht, so lange Membran und Bewehrung noch auf dem Boden liegen. Eine zweite Schalhaut wird aufgelegt und das gesamte System durch Aufblasen in Form gebracht (Abb. 2.1-8 bis -11)<sup>44</sup>.

Eines diesen Prinzipien sehr ähnliches Verfahren, ist jüngst im Rahmen der Forschungsarbeiten am Institut für Tragkonstruktionen der TU Wien entstanden und in ersten Großversuchen realisiert worden. Das entwickelte Fabrikationsprinzip ist zweistufig. Zuerst werden Schalungen für die Betonbauteile liegend platziert, und so die Einzelsegmente vor Ort hergestellt. Sind sie ausgehärtet, wird die darunter befindliche Membran aufgeblasen und so in die finale Form gebracht. Dabei reißen die Betonbauteile auf und lassen so die Krümmung zu. In aufgeblasenem Zustand schließen sich die Lücken zwischen den Segmenten, und durch anschließendes Verspachteln, werden die Fugen verschlossen (Abb. 2.1-12 bis -14)45.

All diese Methoden, mit denen man in der Lage ist, schnell weitspannende Tragwerke sozusagen aus einem Guss errichten kann, unterliegt einer entscheidenden Einschränkung: Eine pneumatisch gestützte Schalung muss natürlich aus einem System aus Überdruck, Stützund gegeben falls ergänzenden Formkörpern<sup>46</sup> herstellbar sein. Sie sind daher für die hier gewünschte freie Formensprache kaum geeignet.



Abb. 2.1-8 bis -11: pneumatisches Schalungsprinzip nach Bini: Die Bewehrung wird ausgelegt, der Beton aufgebracht, die obere Schalhaut aufgelegt und das System aufgepumpt

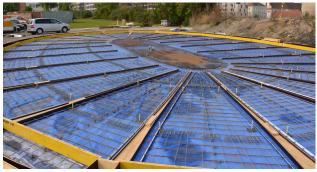






Abb. 2.1-12 bis -14: In der Schalung ausgelegte Bewehrung, im betonierten Zustand und nach dem Aufblasen

41 Sobek, W. Auf pneumatisch gestützten Schalungen hergestellte Betonschalen. 1987. S. 9

42 Ebd. S.10

43 http://www.binisystems.com/ Zugriff 05.09.2016

44 Ebd. S.17

 $45\ http://www.betonbau.tuwien.ac.at/forschung/aktuelle-forschungsprojekte/eine-betonkuppel-zum-aufblasen/\ Zugriff:\ 05.09.2016$ 

46 Sobek, W. Auf pneumatisch gestützten Schalungen hergestellte Betonschalen. 1987. S. 37



Abb. 2.1-15: Typischer Einsatz von Betonhalbfertigteilen in Form von Elementdecken





Abb. 2.1-16 und 17: Herstellung der Betonfertigteile und verbauter Zustand vor der Verlgeung der Dachelemente

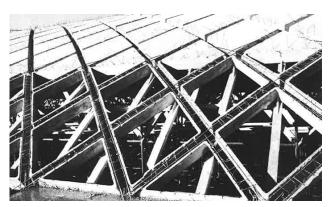


Abb. 2.1-18: Teils eingelegte Ferrozementrauten bei der Ausstellungshalle "C"

Vorfabrikation zur Fügung vor Ort

Die Vorfabrikation von Betonbauteilen im architektonischen Maßstab und deren Nutzung als Betonfertig- und Betonhalbfertigteile, ist fester Bestandteil der baulichen Umsetzung im aktuellen Bauwesen. Ob Elementdecken (Abb. 2.1-15) oder Treppen, Fassaden, oder Konstruktionsbauteile, ein großer Teil des Betonskelettbaus und ein nicht unerheblicher Teil des Betonbaus per se basieren auf dem Konzept von Vorfabrikation im Werk und Montage vor Ort. Die Vorteile der Produktion liegen auf der Hand. Im Werk lassen sich Bauteile von gleichbleibender Qualität unter bestmöglichen Bedingungen wetterunabhängig und hochpräzise fertigen.

Dieses Prinzip jedoch zu nutzen um Betonschalen herzustellen, wirkt auf den ersten Blick nicht unbedingt selbstverständlich.

Im Gegensatz zu den vorgestellten Schalungsprinzipien, die eine schnelle Produktion einer großen Gesamtkonstruktion ermöglichen, mag die Unterteilung in eine Vielzahl auch noch unterschiedlicher Bauteile, auf den ersten Blick als ineffizient und daher eher ungeeignet für den Betonschalenbau wirken.

Dem gegenüber entsprechen die Möglichkeiten einer gesicherten hochqualitativen und –präzisen Werksproduktion sehr wohl dem materialgerechten filigranen Bauen mit Schalen und (das richtige Fügeprinzip vorausgesetzt), eine relativ einfache Montage und vor Allem eine mögliche De- und Remontage der Bauten, der ressourcensparenden umweltgerechteren Planung, die aus Gegenwart und Zukunft des Bauens nicht mehr wegzudiskutieren ist. Pier Luigi Nervi bezeichnete die Vorfabrikation einst als "die Bauart, die strukturmäßig und architektonisch die meisten Möglichkeiten bietet"<sup>47</sup>.

Daher entwickelte und patentierte er ein System zur Herstellung von dünnwandigen mit filigranen Metallgittern bewehrt Betonhalbfertigteile<sup>48</sup>, aus denen vor Ort Träger oder auch Deckplatten in Fertigteilbauweise hergestellt, und anschließend auf dem Schalgerüst platziert und vergossen wurden. Erstmalig 1940 mit den sechs Hangars der Luftwaffe in Orvieto, Ortobello und Torre Puccini verwirklicht (Abb. 2.1-16 und -17), entstanden in dieser sich weiterentwickelnden Bauweise Rippenschalen, Tonnengewölbe oder Fertigteildecken wie neben dem eingangs zitierten Plazetto dello Sport auch die Ausstellungshalle "C" in Turin (Abb. 2.1-18, 1947)<sup>49</sup> und die

47 Rühle, H. Wie wurden Schalen gebaut in Arcus 18 (1992), 32-49, S. 42

48 Greco, C. und Nervi P. L. *Pier Luigi Nervi: von den ersten Patenten bis zur Ausstellungshalle in Turin 1917-1948*. Quart-Verlag, 2008. S.188

Wollspinnerei Gatti in Rom (1951)50.

Auch eine Kombination der beiden Techniken von vorfabrizierten Betonbauteilen und einer pneumatischen Schalung wurde schon angedacht. Um den starken Verformungen die während des Betonierens auf einer pneumatischen Schalung auftreten und somit die Spannweiten begrenzen, wollte Jörg Schlaich mit dem auflegen von Betonfertigteilen und einem anschließenden Verguss der Fugen begegnen und somit die baubaren Spannweiten erhöhen<sup>51</sup>. Der Entwurf einer so ausgebildeten 100 Meter spannenden (Abb. 2.1-19) Schale wurde allerdings nicht umgesetzt.

## Alternative Schalungskonzepte

Zwei Beispiele, die sich in diesem Kontext nur schwer einordnen lassen, werden aufgrund ihrer Relevanz und Aktualität an dieser Stelle dennoch kurz behandelt. Dies sind zum einen das Heißdrahtschneiden von Schalungsblöcken und zum anderen das 3d-Drucken von Beton.

Das Heißdrahtschneiden von XPS- oder EPS-Schäumen zur Herstellung von Betonschalen wird aufgrund seiner hohen Fertigungsgeschwindigkeit Gegenstand der Untersuchungen von Rahmen der Forschungsarbeiten von Odico Formwork Robotics untersucht.

Dazu wurden unter anderem Strategien entwickelt, durch kontrolliert verformbare Schneiden die Fertigung von doppelt gekrümmten Flächen zu ermöglichen und somit die Herstellung von komplexeren Geometrien zu ermöglichen<sup>52</sup>. Diese Technik stellt somit eine Weiterentwicklung eines subtraktiven Herstellungprozesses von Schalkörpern dar, welcher im Rahmen des dieser Arbeit übergeordneten FFG-Forschungsprojektes explizit substituiert werden soll.

Die additive Fertigung von Kunststoffen, Metallen und eben auch Betonen, nimmt einen wichtigen Platz im aktuellen Diskurs zur digitalen Fabrikation ein (Abb. 2.1-21). Diese Form der Fabrikation wird im Rahmen dieser Arbeit aber nicht als gegenüberzustellendes Alternativkonzept betrachtet, sondern vielmehr als eigenständiges Thema im Betonbau betrachtet, welches in seiner ge-genwertigen Form auch ergänzendes Betonierkonzept zur vorgeschlagenen Lösung herangezogen werden kann.

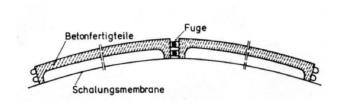


Abb. 2.1-19: Konzeptskizze zur Herstellung von Schalenbauten aus Betonfertigteilen

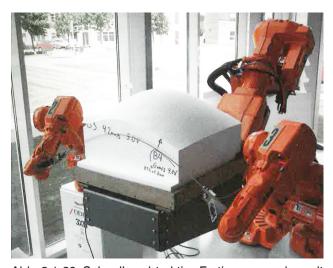


Abb. 2.1-20: Schnelle subtraktive Fertigung von doppelt gekümmten Betonschalungen durch kontrolliert verformte Heißdrahtschneiden



Abb. 2.1-21: Additive Fertigung von Betonwänden mittels 3d-Druck

49 Ebd. S.274

50 Ebd. S.274

51 Sobek, Werner. Auf pneumatisch gestützten Schalungen hergestellte Betonschalen. 1987. S. 31

52 Søndergaard, A, et al. "Robotic Hot-Blade Cutting." Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016. Springer International Publishing, 2016. 150-164. S.151



Abb. 2.1-22: Einstellung der adaptiven Schalung



Abb. 2.1-23: Herstellung der Wachsform



Abb. 2.1-24: Darstellung des Ausschalens eines Betonbauteil aus der Wachsform

### **Adaptive Schalungen**

Eine nach wie vor die aktuelle Diskussion zur effizienten Herstellung von Schalen- und Freiformgeometrien dominierende Lösungsstrategie, ist aber weiterhin die adaptive Schalung in Form digital steuerbarer elastisch verformbarer Schaltische.

Nach der im ersten Kapitel schon erläuterten Erfolglosigkeit solcher Systeme, hat diese Idee in den vergangenen Jahren, durch die neuen Ansätze zur Verknüpfung von Architektur und Fabrikation, wieder verstärkte Aufmerksamkeit erfahren. Dabei sind einige Konzepte entstanden, von denen die für die eigene Arbeit relevantesten Ansätze hier aufgeführt und kurz erläutert werden.

Die hier durchgeführte Betrachtung wurde vornehmlich unter dem Aspekt der Funktionsweise vorgenommen und zeigt den Stand der Forschung. Detailliertere Studien und Vergleiche der Systeme, auch der am Institut entwickelten, sind im Rahmen der Forschungsarbeit von Gernot Parmann entstanden.

### ETH Zürich - TailorCrete58

Aufbau der adaptiven Schalung: Das Konzept basiert auf einem Rahmen von 6 x 6 Stempeln in einem Abstand von ca. 120 mm. Die auf Kugelgelenken gelagerten Stempelköpfe sind gleitend mit einer ca. 40 mm dicken Schalhaut verbunden und werden zusätzlich über orthogonal angeordnete flexible Stäbe gekrümmt. Die Ansteuerung erfolgt durch einen Industrieroboter, wobei das genaue Verfahren und die Art der Fixierung in eigestellter Position nicht näher erläutert werden und daher unbekannt sind. Das Verfahren ist aber offensichtlich seriell und nicht simultan.

Formgebungsprozess (Abb. 2.1-22 bis -24):

Die Stempel werden nacheinander eingestellt. Bei diesem Verfahren wird die Einstellung einer Positivform vorgenommen und dann hiervon eine Wachsform abgenommen. Diese Wachsform dient dann als Schalkörper für die Betonbauteile. Die zweite Form wird unabhängig nachfolgend gefertigt. Die beiden Wachsformen dienen dann als Schalung die für einen Einsatz vor Ort gedacht ist.

Anmerkungen zum Konzept: Durch die Nutzung eines Industrieroboters als Einstellungs-

58 http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/164.html, Zugriff: 16.09.2016

59 Oesterle, S., Vansteenkiste A., and Mirjan, A. Zero waste free-form formwork. in Proceedings of the Second International Conference on Flexible Formwork, ICFF. CICM and University of Bath, Dept. of Architecture and Civil Engineering. Vol. 30. 2012. 258-267 S.260

werkzeug, ist das System relativ einfach und im Vergleich kostengünstig. Die Einstellungszeit ist durch die serielle Einstellungsabfolge länger als bei simultaner Ansteuerung. Die Verwendung einer Wachsform als tatsächliche Schalung ermöglicht allerdings einen deutlich schnelleren Wiedereinsatz der adaptiven Schalung. Die beidseitige Schalung ermöglicht die Zusammenstellung von unabhängig zueinanderstehenden Geometrien. Somit sind auch Bauteile mit stark variierenden Materialstärken herstellbar. Das Schwindmaß des verwendeten Wachses stellt allerdings eine einschränkende Größe in der Fertigungstoleranz dar <sup>59</sup>.

# ADAPA - Adaptive Mould<sup>60, 61</sup>

Aufbau der adaptiven Schalung: Das Konzept der Firma ADAPA basiert auf einer gerasterten Anordnung mit in einem Abstand von 200 mm zueinander stehenden insgesamt 64 Stempeln, die fest mit einer Schalhaut verbunden sind. Zum Rand hin reduziert sich der Abstand der Stempel auf 100mm. Auf einem Feld mit den Maßen 1200 mm x 1200 mm und einem möglichen Verfahrweg in der z-Achse von 400 mm, befinden sich je nach Modell 8 x 8 oder 12 x 12 Stempeln. Jeder Stempel wird durch einen eigenen Stellmotor (NEMA 23 Stepper Motor) angesteuert. Die Position des aufzubringenden Materials wird über eine Laserprojektion angezeigt.

Formgebungsprozess (Abb. 2.1-25 bis -28):

Das zu formende Material wird in der flachen Grundeinstellung direkt auf den Schaltisch aufgebracht, die Schalung wird mittels simultanen Verfahrens verformt, bis die finale Formgebung erfolgt ist. Nachdem das Material ausgehärtet ist, wird die Schalung wieder in die Grundposition zurückgefahren und das Werkstück entnommen.

Anmerkungen zum Konzept: Das System ermöglicht durch die jedem Stempel zugeordneten Stellmotoren eine simultane und somit zeitsparende Einstellung. Diese steht jedoch einer langen Belegzeit bis zur Aushärtung des Werkstücks gegenüber. Das System erzeugt zwei unterschiedliche Oberflächenqualitäten, da nur einseitig geschalt wird. Auch die Materialstärke ist somit nur bedingt variierbar.









Abb. 2.1-25 bis -28: Darstellung des Ausschalens eines Betonbauteil aus der Wachsform

60 http://adapa.dk/ Zugriff: 05.05.2016

61 Raun, Christian, and Poul Henning Kirkegaard. "Reconfigurable double-curved mould." . in Proceedings of the Second International Conference on Flexible Formwork, ICFF. CICM and University of Bath, Dept. of Architecture and Civil Engineering. Vol. 30. 2012. 258-267 S.260

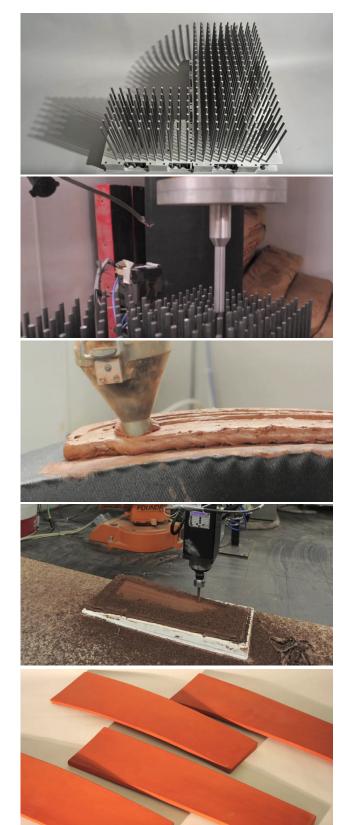


Abb. 2.1-29 bis -33: Modell des erweiterbaren Pinfeldes, Einstellung Materialauftrag und Fräsbearbeitung der Oberfläche, gefertigte Bauteile (Rendering)

MAP+S Group - 3d-Printing Ceramics<sup>62</sup>

Aufbau der adaptiven Schalung: Das Konzept basiert auf einem gebohrten Feld von 10 x 7 Metallstifte mit einem Durchmesser von ca. 6mm in einem Abstand von ca. 25mm. Diese Felder sind so konzipiert, dass sie durch beliebig viele Felder erweitert werden können. Die Pins werden durch einen Industrieroboter nacheinander in Position geschoben. Ein Mechanismus zur Fixierung in der finalen Position ist nicht erkenntlich.

Formgebungsprozess (Abb. 2.1-29 bis -33):

Nachdem verschieben der Stifte, wird eine Schalhaut über die eingestellte Form gespannt und so die Lücken zwischen den Pins geschlossen. Das zu formende Material wird von einem robotergeführtem Extruder auf die Schalhaut aufgetragen. Nach dem Aushärten des Materials, wird die Oberseite überfräst und die Kanten freigestellt, und somit das fertige Bauteil hergestellt

Anmerkungen zum Konzept: Durch die Nutzung eines Industrieroboters als multifunktionales Werkzeug ist das System relativ einfach, versatil und im Vergleich kostengünstig. Die Form selber ist allerdings bis zur endgültigen Fertigstellung des Werkstücks belegt. Die Nachbearbeitung mittels Fräsen ermöglicht die Herstellung von Bauteilen mit variierenden Wandstärken. Der Charakter der Form selber ist einfach und modellhaft. Die fehlende Randabschalung lässt nur eine Verarbeitung von hochviskosen Stoffen zu.

# TU Delft - Flexible Mould Project

Aufbau der adaptiven Schalung: Im Rahmen der Forschungen an der TU Delft sind über die Jahre diverse Konzepte entwickelt worden<sup>63</sup>. Umgesetzt und somit für die Betrachtung maßgebend ist das 2009 entwickelte Modell von Vollers und Rietenberg (Abb. 2.1-34). Das Konzept basiert auf einer gerasterten Anordnung mit in einem Abstand von ca. 80 mm zueinander stehenden Stempeln, über an den gelenkigen Stempelköpfen miteinander verbunden sind.

Jeder Stempel wird durch einen eigenen Stellmotor und somit simultan angesteuert. Formgebungsprozess: Die Ansteuerung selbst ist nicht erläutert. In den publizierten Tests sind die Stempel in der Z-Achse frei verschieblich, und werden durch das Ablassen auf eine existierende Form eingestellt. Der Prozess ist bis dato daher nicht wirklich formgebend, sondern form-

62 http://research.gsd.harvard.edu/maps/portfolio/printing-ceramic-louvers/ Zugriff 08.08.2016

63 Schipper, H. R. Double-curved precast concrete elements: Research into technical viability of the flexible mould method. Diss. TU Delft, Delft University of Technology, 2015. S.45

abbildend. Die Abfolge sieht wie folgt aus. Der Beton wird angemischt und eine Randabschalung aufgebracht (dies ist nur in Skizzen postuliert aber noch nicht in praktischen Versuchen belegt). Der Beton (Self Compacting Concrete) wird in die Form eingebracht und verbleibt dort unverändert bis zu einem bestimmten Punkt des Abbindeprozesses (ca. 30-60 Minuten)<sup>64</sup>. Erst zu diesem Zeitpunkt, wenn der Beton fest genug ist um nicht mehr über die Form überzutreten, aber noch flüssig genug, dass sich keine Risse bilden, wird die finale Form eingestellt. Nachdem härtet das Material ausgehärtet ist, wird das Werkstück entnommen (Abb. 2.1-35).

Anmerkungen zum Konzept: Das System ist dem von ADAPA sehr ähnlich und bietet die gleichen Vor- und Nachteile.

### Fazit

Übereinstimmend basieren alle vorgestellten Systeme dabei auf einem orthogonal gerasterten Feld von Aktuatoren, welche von einer Schalhaut überspannt und digital angesteuert werden. Die im Rahmen der Arbeit präsentierten Konzepte illustrieren einen Trend zu auf Abstand gestellten und mit einer Schalhaut fest verbundenen Stempelköpfen und somit einer möglichst geringen Anzahl von Aktuatoren. Dies bedingt zum einen eine detaillierte Auseinandersetzung mit der Schalhaut und dem Verbindungspunkt zum Stempelkopf, zum anderen wird durch die Anzahl der Aktuatoren die Abbildungsgenauigkeit vom Freiformen beeinflusst, was letztendlich nur durch eine Anpassung der Zielgeometrie zu lösen ist. Zur Ansteuerung gibt es sowohl den Ansatz der simultanen Verformung durch ein 1:1 Verhältnis von Stellmotor zu Aktuator, als auch den Einsatz externer serieller Ansteuerungswerkzeuge, wie Industrieroboter. Es wird sowohl auf die eingestellte Schalung betoniert, als auch zusätzliche Formen aus recyclingfähigen Stoffen abgenommen.



Abb. 2.1-34: Funktionsmodell einer adaptiven Schalung nach Vollers und Rietbergen

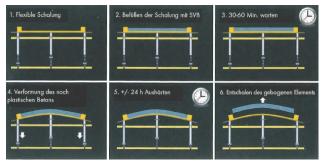


Abb. 2.1-35: Zeitliche Abfolge im Herstellungsprozess doppelt gekrümmter Betonelemente

# 2. Vorstudien

# 2.2 Ansteuerung Schaltischvarianten



Abb. 2.2-1: Funktionsmodell Pixelfeld (10x30 Pixel)



Abb. 2.2-2: Einstellrad auf Roboter montiert

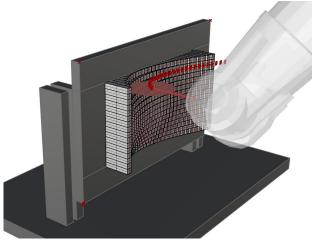


Abb. 2.2-3: Grafische Simulation eines Werkzeugpfades

## Ansteuerungsversuche

Im Rahmen der Recherche- und Entwicklungsarbeiten haben sich aus einer Vielzahl von Konzepten adaptiver Schalungstypen zwei Varianten herauskristallisiert, die im Rahmen des Projektes untersucht wurden. Von diesen Varianten mit den Arbeitstiteln "Pinfeld" und "Pixelfeld" wurden in der Folge Funktionsmodell im Maßstab 1:5 gefertigt und geeignete Ansteuerungskonzepte entwickelt. Diese wurden mit den im ABB-Labor zur Verfügung stehenden ABB IRB 140 in praktischen Versuchen getestet. Zu diesem Zeitpunkt waren die Spezifikationen noch nicht zwingend den jeweiligen Varianten zugeordnet. Erkenntnisse, die systemübergreifend relevant wären oder von einem auf das andere System übertragen werden könnten, sollten so ermittelt werden. Wichtiges Unterscheidungsmerkmal zu diesem Zeitpunkt der Forschung war die Methode zur Ansteuerung, auf die im Folgenden eingegangen wird.

# Schalungsprototyp "Pixelfeld" Prototypenkonzept Gernot Parmann

### Pixelfeld Aufbau

Das Pixelfeld besteht aus einem dichten Feld von verschieblichen Quadern. Das Modell besteht aus 15x30 Pixeln mit einem Querschnittsmaß von 10mm x 10mm, die abstandslos nebeneinander liegen und zu einer Feldgröße von 150 x 300mm führen (Abb. 2.2-1). Die Auflösung beträgt somit 100 Pixel/dm². Die Pins werden über Schrauben im Rahmen geklemmt und somit reihenweise fixiert. Aufgrund der abstandslosen Ausführung der Pixel ist bei diesem System eine Verwendung einer Schalhaut nicht obligat. In diesem Fall bilden die Pixel direkt die Oberfläche mit einem immanenten Muster ab.

### Einstellungswerkzeug

Das im Versuch verwendete Werkzeug zur Einstellung ist ein am Industrieroboter befestigtes Einstellungsrad mit einem Durchmesser von 80mm (Abb. 2.2-2). Die Einstellung der Pixel erfolgt durch Verschieben des am Feld entlangfahrenden Rades.

### Funktionsweise Script

Die einzustellende Geometrie wird auf die virtuelle Pixelfläche projiziert und in 15 Kurven entlang der Pixelreihen unterteilt. Diese Kurven wiederum in 30 Punkte unterteilt. Eine Distanzmessung zwischen Pixelmittelpunt und einzustellender Kurve ermittelt den Berührungspunkt von Werkzeug und Pixel und somit den Werkzeugpfad des Roboters (Abb. 2.2-3). Dabei ist neben der einzustellenden Kurve, die Werkzeuggeometrie des Einstellungsrades entscheidender Parameter für den Werkzeugpfad. Hierbei ist zu beachten, dass der Toolcenterpoint, also der der Punkt des Endeffektors, der für die Einstellung verantwortlich ist, nicht automatisch der Punkt ist der auch zur Einstellung führt.

## Ansteuerung und Restriktion

Die Ansteuerung erfolgt seriell in Reihen, die S-förmig abgefahren werden. Nach jeder Reihe stoppt der Roboter und die eingestellt Reihe wird via Klemmen fixiert.

Der Durchmesser des Einstellungsrades begrenzt sowohl den minimal einstellbaren Radius und die pro Zyklus erreichbare Einstellungstiefe. Natürlich kann kein Radius eingestellt werden, der geringer ist als der vom Einstellrad selbst. Auch muss das Werkzeug in einem Winkel auf den einzustellenden Pixel treffen, der zu der gewünschten Verschiebung des Pixels in Aktionsrichtung führt und möglichst geringen seitlichen Druck aufbaut, da dieser zu einem Mitverschieben der folgenden Pixel führen kann oder gar zu einem Blockieren des Pixel selbst. Bei dem im Modell verwendeten Einstellungsrad beträgt der minimale Radius in der Folge 40mm. Ausgehend von einem maximalen Auftreffwinkel von 45° beträgt die maximale Einstellungstiefe x = 11.76mm (Abb. 2.2-4). Für tiefere Einstellungen, müssen diese in mehreren Zyklen erfolgen. Somit können im Verhältnis kleine Einstellungsräder auch hohe Einstellungstiefen erreichen.

## Ausführung und weiterführende Konzepte

Im ausgeführten Modell trat ein unbeabsichtigtes Mitverschieben benachbarter Pixel in großer Häufigkeit auf. Daher wurde für das Einstellungsrad das Konzept einer Klammer entwickelt, bei der ein zusätzliches Rad, das über einen Rahmen auf der gegenüberliegenden Seite des Pixelfeldes geführt wird, dieses Mitverschieben verhindern sollte (Abb. 2.2-5). In der weitergeführten Version wurde dann das Werkzeug vereinfacht und in Form eines Stiftes ausgeführt. Die Einstellung erfolgt nun Pixel per Pixel (Abb. 2.2-6).

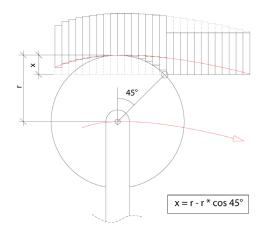


Abb. 2.2-4: Verhältnis der maximale Einstellungstiefe eines Einstellradszu seinem Durchmesser



Abb. 2.2-5: Digitales Funktionsmodell eines über eine Klammer

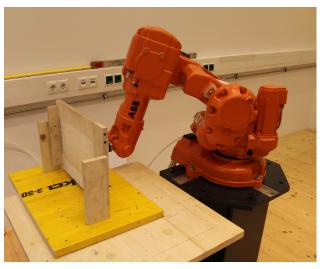


Abb. 2.2-6: Ansteuerung Pixel für Pixel



Abb. 2.2-7: Funktionsmodell Pinfeld (7x7 Pixel)

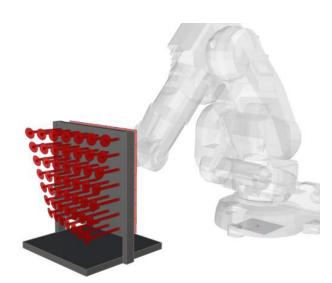


Abb. 2.2-8: Grafische Simulation der Ansteuerung

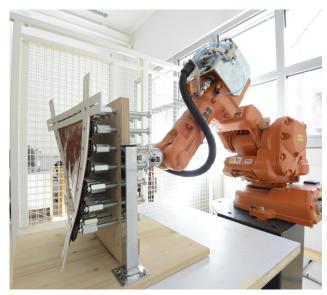


Abb. 2.2-9: Ansteuerung des Pinfeldes

### Schalungsprototyp "Pinfeld"

Prototypenkonzept Felix Amtsberg

#### Pinfeld Aufbau

Das Pinfeld besteht aus einem Feld von 7x7 "Pins" die einem Abstand 40mm orthogonal gerastert angeordnet sind, und zu einer Feldgröße von 280 x 280mm (Abb. 2.2-7). Die Auflösung beträgt somit 6.25 Pixel/dm². Der Schaft eines Pins ist in Form einer M8 Schlossschraube ausgeführt und ermöglicht so die Einstellung durch Ein- bzw. Herausdrehen der Schraube.

Auf Kugelgelenken gelagerte Stempel mit einem Durchmesser von 38mm bilden den Abschluss der Pins und sind über eine Verschraubung mit einer 2mm starken Elastomerschalhaut fest verbunden. Die Ränder sind durch eine zweilagige überkreuzende Randabschalung versteift.

### Einstellungswerkzeug

Das im Versuch verwendete Werkzeug zur Einstellung ist ein direkt am Industrieroboter befestigter Steckschlüssel mit einer 19er Nuss. Die Einstellung der Pins erfolgt über die sechste Achse des Roboters, deren Arbeitsbereich von +400° - 400° entsperrt wurde (die theoretische Spanne beträgt +163 - -163 Umdrehungen).

### Funktionsweise Script

Die einzustellende Geometrie wird auf die virtuelle Pinfeldfläche projiziert und in 7 x 7 Kurven unterteilt (Abb. 2.2-8). Die Einstellungstiefe pro Pin wird in die notwendigen Umdrehungen umgerechnet (1 Umdrehung eines M8-Gewindes entspricht einer Steigung um 1.25mm). Um die Umdrehungen von der sechsten Achse des Roboters ausführen zulassen, ist eine Unterteilung in Targets (also vom Toolcenterpoint ansteuerbare Ziele) notwendig. Hierbei ist es nicht ausreichend den Start- und Endwert der Einstellungen anzugeben. Um eine kontrollierte Rotationsbewegung der Achse im oder gegen den Uhrzeigeersinn zu erhalten ist eine eindeutige Unterteilung notwendig. Daher werden die Umdrehungen in 90° Schritten über Targets dargestellt. Eine Einstellung von 187° erfolgt in folgenden Schritten: 90°, 180°, 187°, eine Einstellung von 367°: 90°,180°, 270° 360°, 367°.

### Ansteuerung und Restriktion

Die Ansteuerung erfolgt seriell. Die Schrauben sind bei diesem Steigungswinkel selbsthemmend und müssen nicht zusätzlich geklemmt werden (Abb. 2.2-9). Die maximale Zustellung eines Pins ist abhängig von der durch die Schalhaut auf aufnehmbare Spannung. Durch

die feste Verbindung zwischen Schalhaut und Stempelkopf, führt eine Zustellung zu lokalen Spannungsspitzen. die von der Schalhaut elastisch aufgenommen werden müssen. Soll eine tiefere Einstellung erfolgen muss diese wieder in Zyklen ausgeführt werden. Das verwendete Script hat diesen Wert als Variable definiert und reagiert entsprechend auf die Anforderung. Ein vollständig eingestellter Pixel wird nicht mehr angefahren, auch wenn seine Nachbarn noch Einstellungen benötigen.

### Ausführung und weiterführende Konzepte

Die Ausführung der Einstellungen verlief zuverlässig und fehlerfrei. Die auftretenden Spannungen der Elastomerschalhaut führen allerdings je nach Krümmung zu unkontrollierten Neigungen der Stempelköpfe, weshalb hierzu unterschiedlich Designs entwickelt wurden. Diese sind aber aufgrund der Entscheidung für eine Weiterverfolgung des Schalungsprinzips "Pixelfeld" nicht ausgeführt worden.

### Robotergestütztes Betonieren

Der Schalungsprototyp wurde dennoch weiterverwendet um in weiteren Versuchen die robotergesteuerten Betonage direkt auf der Schalung und ohne Konterschalung modellhaft zu ermöglichen. Der gleichbleibenden Funktion der Einstellung wurde hierzu eine Erweiterung hinzugefügt, die die automatische Generierung eines Werkzeugpfades zum kontrollierten Auftragen von Beton ermöglicht. Zur Demonstration der Versatilität wurden zwei Segmente auf Grundlage der gleichen Geometrie gefertigt (Abb. 2.2-10 und -11). Zum einen parallel verlaufende Linie, die eine komplett geschlossenes Segment zur Folge haben und zum anderen ein Muster, das verschiedene Öffnungsgrade zulässt und eine changierende Gesamtstruktur aus einer größeren Anzahl ermöglicht. Damit wurde auch der mögliche Verzicht einer Randabschalung bei der Herstellung komplexerer Bauteile erstmalig aufgeworfen.

Der Schalungsprototyp wurde dennoch weiterverwendet, um in weiteren Versuchen die robotergesteuerten Betonage direkt auf der Schalung und ohne Konterschalung modellhaft zu ermöglichen. Der gleichbleibenden Funktion der Einstellung wurde hierzu eine Erweiterung hinzugefügt, die die automatische Generierung eines Werkzeugpfades zum kontrollierten Auftragen von Beton ermöglicht (Abb. 2.2-12). Zur Demonstration der Versatilität wurden zwei Segmente auf Grundlage der gleichen Geometrie gefertigt. Zum einen parallel verlaufende Linie,

die eine komplett geschlossenes Segment zur Folge haben und zum anderen ein Muster, das verschiedene Öffnungsgrade zulässt und eine changierende Gesamtstruktur aus einer größeren Anzahl ermöglicht. Damit wurde auch der mögliche Verzicht einer Randabschalung bei der Herstellung komplexerer Bauteile erstmalig aufgeworfen. Der Schaltisch wird zum Auftragen um 90° gedreht und der Endeffektor gewechselt. Der montierte Betonextruder fährt normal zur Oberfläche und trägt die Betonmischung gleichmäßig auf die Schicht auf. Zwei gänzlich unterschiedliche Prozesse zur Herstellung, werden vom gleichen Script generiert und direkt hintereinander von der gleichen Maschine ausgeführt.

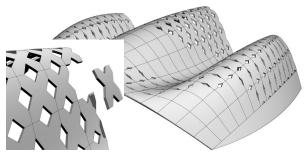


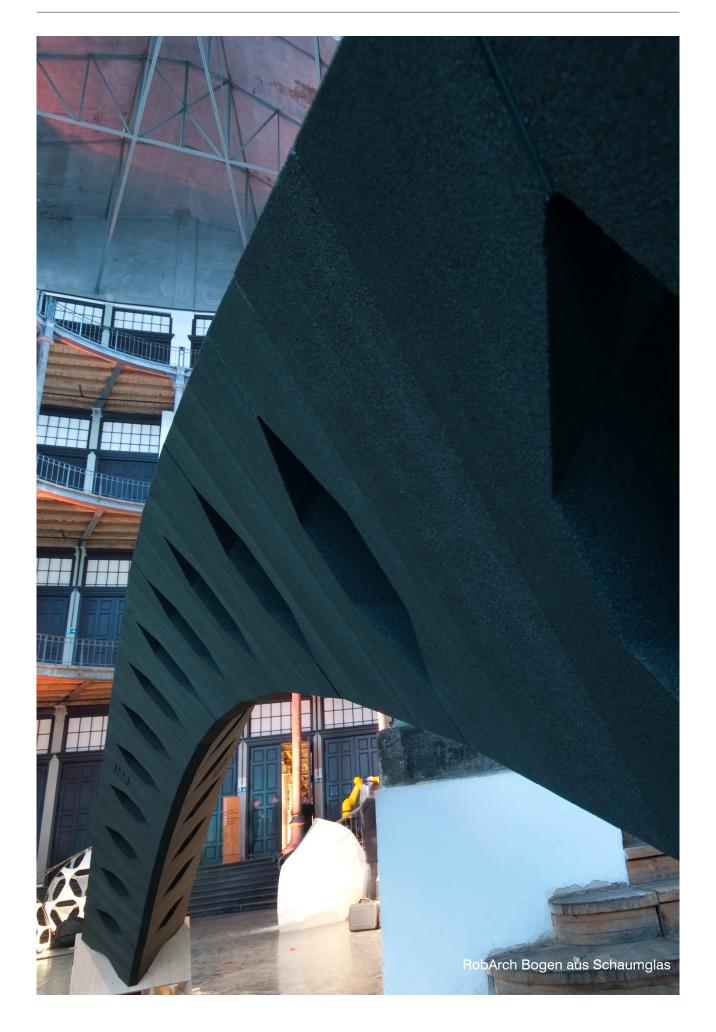
Abb. 2.2-10: Digitales Modell einer Betonfreiform als Fallstudie zur Herstellung der Beton-Prototypen



Abb. 2.2-11: Hergestellte Varianten der gleichen Krümmung, Module mit varriieren in der Extrusionsführung



Abb. 2.2-12: Robotisch geführte Betonextrusion auf der adaptiven Schalung zur Herstellung eines Prototypen



# 2. Vorstudien

# 2.3 Trockene Verbindungen

## **Einleitung**

Neben der adaptiven Schalung und deren Ansteuerung ist die zweite Komponente dieser Arbeit die Fügung der mittels der Schalung hergestellten Betonbauteile. Sie konzentriert sich dabei auf die Analyse der fabrizierten Kontaktflächen, nicht die Berechnung oder Entwicklung der Verbindungsmittel. Die sind Gegenstand der Forschungsbemühungen von Gerhard Santner (siehe Abb. 1.2-1). Dennoch sollen zum Verständnis hier die Grundlagen des entwickelten Prinzips kurz erläutert werden.

# Die Kunst der Fuge

1971 beschrieb Konrad Wachsmann in seinem Geleitwort zu seiner Ausstellung Konrad Wachsmann - 50 Jahre Leben und Arbeiten für die Industrialisierung des Bauens: "Das Wort "Bauen" sollte aus dem Vokabularium verschwinden und ersetzt werden durch ein Wort, dass den Begriff der Montage beschreibt, des trockenen Fügens, das heißt die Kunst des Fügens oder besser die Kunst der Fuge." <sup>65</sup>.

### Verbindungstypologien

Das Prinzip des Fügens von Bauteilen ermöglicht die Herstellung eines großen Gesamtkonstrukts aus einer Anzahl bedeutend kleinerer Bauteile. Der dazu notwendige Zusammenschuss der verwendeten Bauteile kann in drei Kategorien unterteilt werden. Es handelt sich hierbei um kraftschlüssige Verbindungen (durch beispielsweise das Niederspannen eines Objektes), formschlüssige (Beispielsweise eine Verzahnung wie die kunstvollen Schwalbenschwanzzinken im Möbelbau) oder stoffschlüssige Verbindungen (z.B. Verkleben oder Verschweißen im Stahlbau). Diese drei Varianten bilden die gesamte Vielfalt des Fügens ab (Abb. 2.3-1 bis -3). Betonbauteile, bei denen die Fuge Kräfte übertragen soll, werden in der Regel stoffschlüssig, durch Verguss der im Werk gefertigten Bauteile mit Ortbeton verbunden. Dies gilt besonders für die bisher gefertigten Betonschalen aus vorfabrizierten Segmenten. Sowohl die im Rahmen dieser Arbeit zitierten Projekte von Pier Luigi Nervi, als auch das Konzept von Jörg Schlaich. oder die an der TU Wien entwickelte Produktionsmethode zu pneumatisch gestützt hergestellten Schalen, sehen abschließend eine stoff-

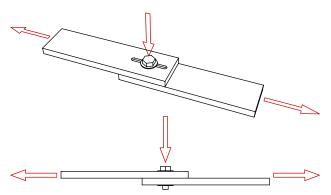


Abb. 2.3-1: Kraftschlüssige Verbindung, die Kraft wird über die Vorspannkreft der Schraube übertragen

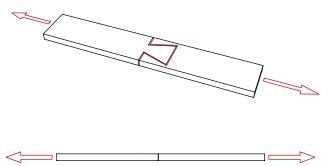


Abb. 2.3-2: Formschlüssige Verbindung, die Kraft wird über die Geometrie des Schwalbenschwanzzinken übertragen

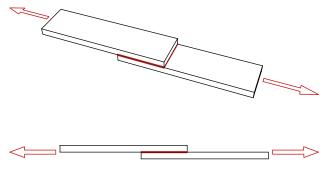


Abb. 2.3-3: Stoffschlüssige Verbindung, die Kraft wird über eine Verleimung übertragen

65 Wachsmann, K. Wendepunkt im Bauen. Vol. 160. Krausskopf-Verlag, 1959. S.VI



Abb. 2.3-4: Anschlussbewehrung bei Betonfertigteilen am Beispiel einer Treppe



Abb. 2.3-5: Schalgerüst zum Verguss der Betonfertigteile bei der Ausstellungshalle "Salone Principale", Turin



Abb. 2.3-6: hohe Querschnitte ermöglichen trocken gefügte Steinbögen



Abb. 2.3-7: Trocken gefügter UHPC- Bogen der Wild-Brücke in Völkermarkt

schlüssige Verbindung vor.

Die Vorteile des Vergusses sind offensichtlich. Die Wirkungsweise ist hinreichend erprobt. Die Fuge kann gleichermaßen Toleranzen von Seiten der Vorfertigung, als auch auf Seiten der Baustelle aufnehmen. Die Halbfertigteilbauweise gilt gemein als wirtschaftlich, wenn auch gerade die vorbereitenden Maßnahmen, in Form der in der Regel notwendigen Aussparungen zum Verguss und die Anschlussbewehrung in ihrer Herstellung verhältnismäßig aufwändig sind (Abb. 2.3-4 und -5).

### Form- und Kraftschluss

Besonders in der aktuellen Diskussion zum ressourcenschonenden Planen und Bauen, wird der einfach Rückbau eines Konstruktes, und die möglichst effiziente Rückführung von Bauteilen in den stofflichen Kreislauf thematisiert. Verbindungen sollen wieder lösbar sein, das Gesamtobjekt somit adaptierbar, revisionierbar und wieder demontierbar sein. Naturgemäß sind diese Ziele mit mechanischen Verbindungen, die zu einem Kraft- oder Formschluss führen leichter zu erreichen.

Betrachtet man die Geschichte des Bauens, die ersten Ausführungen von Bögen und Gewölben aus Natur- oder Kunststein, kommen diese grundsätzlich ohne eine stoffschlüssige Verbindung aus (Abb. 2.3-6). Durch eine präzise Fertigung der Einzelsegmente in Form hochwertiger Steinmetzarbeiten, und den Zusammenbau in statisch material- und verbindungsgerechten, weil vornehmlich druckbeanspruchten Konstruktion, sind schon früh weitspannende Tragwerke entstanden, die gänzlich ohne zusätzliche Verbindungsmittel auskommen. Die auftretenden Lasten werden durch die Kontaktflächen übertragen und abgeleitet, die Druckfestigkeit des Materials bestimmt die aufnehmbare Last. Solche Systeme können allerdings kaum Biegemomente aufnehmen und reagieren daher empfindlich auf exzentrische oder punktuelle Lasten. Liegt die Stützlinie außerhalb des Systems kollabiert es. Daher sind solche Tragwerke mit relativ starken Bauteildicken und einem hohen Eigengewicht dimensioniert, oder beispielsweise mittels Abspannung formstabilisiert (Suchov-Bogen)66.

## Form, Material und seine Verbindung

Um in der Formenwahl der Gesamtgeometrie freier zu sein oder ungünstige Lastverteilungen

66 Block, P. et al. Faustformel Tragwerksentwurf. DVA, 2015. S.134

auch bei dünnen Materialstärken mit einer trockenen (also nicht vergossenen oder verklebten) Fuge aufnehmen zu können, muss diese auch die auftretenden Querkräfte und Biegemomente ableiten können. Dies kann durch eine intelligente Verzahnung der Bauteile selbst erfolgen<sup>69</sup> oder auch durch die Verwendung externer mechanischer Verbindungssysteme.

Im Stahl- und vor allem im Holzbau finden sich zu beiden Verbindungsvarianten mannigfaltige Beispiele, die maßstabsübergreifend eingesetzt werden; seien es klassisch die Schraubverbindungen im Stahlbau oder die Verzahnung durch Zinken oder Zapfen im Möbel- und Holzbau.

Die Anforderungen des Betonbaus haben diesbezüglich eine gewisse Dimension noch nicht unterschritten. Die im Rahmen des Projektes geforderten Verbindungssysteme stehen auch im Zusammenhang einer Weiterentwicklung des Werkstoffs von klassischen Beton zu UHPC, der aufgrund seiner Gefügedichte und des niedrigen WZ-Wertes, hohe Festigkeitswerte erreicht und somit geringere Querschnitte ermöglicht. Die daraus resultierenden Anforderungen sind im Betonbau ein Novum und nur mit wenigen Beispielen aus der baulichen Praxis dokumentiert.

Die kraftübertragende Verbindung einer trockenen Fuge kommt im klassischen Betonbau wenig vor, und wenn dann in der Regel als eine nachträglich eingesetzte Bewehrung. Wenige Beispiele von Spannbetonsegmenten im Brückenbau stellen quasi die einzigen geplanten Beispiele solcher Verbindungen dar.

Eine erste Referenz, welche das Prinzip der Fertigung und die Wirkungsweise der angestrebten Verbindung thematisiert, sind die Segmentstöße des Beton-Sprengwerk-Bogens der "Wild-Brücke" in Völkermarkt (Abb. 2.3-7).

Der UHPC-Bogen der an der TU Graz entwickelten Brücke besteht aus einem dreifachen Sprengwerk (Abb. 2.3-8). Die insgesamt sechs geraden Segmente, die einen vereinfachten Bogen formen, stoßen stumpf aufeinander, und werden durch 20-24 im Hohlkasten verlaufende Spannlitzen vorgespannt<sup>67</sup>. Damit bei eine sol-

che Fuge dicht ist, zur Vermeidung von Längsrissen durch Querzug in der Fugenkontaktzone und für die Einhaltung der Bogengeometrie ist eine sehr genaue Fertigung der Kontaktflächen notwendig. Die genutzte Fräsanlage erlaubte die geforderte Fertigungstoleranz von ±0.1mm<sup>68</sup> (Abb. 2.3-9).

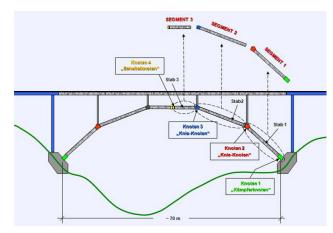


Abb. 2.3-8: Abstraktion des Bogens, ein aus sechs Segmenten hergestelltes Sprengwerk



Abb. 2.3-9: CNC-Fräsanlage der Firma Max Bögl währen der subtraktiven Bearbeitung der Kontaktflächen

67 Reichel, M., Sparowitz L. und Freytag, B. *Wildbrücke Völkermarkt-vorgespanntes Bogentragwerk aus UHFB-Segmentfertigteile*n in Beton-und Stahlbetonbau 106.11 (2011): 760-769. S.761-763

68 Reichel, M., Sparowitz L. und Freytag, B. *Wildbrücke Völkermarkt-vorgespanntes Bogentragwerk aus UHFB-Segmentfertigteile*n in Beton-und Stahlbetonbau 106.12 (2011): 827-835. S.828

# 2. Vorstudien

# 2.4 The RobArch

# **Einleitung**

Die im vorigen Kapitel beschriebene Verbindung einer im Bauwesen ungewöhnlich präzisen Fräsbearbeitung von lastabtragenden Konstruktionen wurde am Institut für Tragwerksentwurf im Rahmen der folgenden Studie erstmalig thematisiert, und im Rahmen eines Workshops des Rob|Arch Symposiums 2012 gefertigt und anschließend im Rahmen der Konferenz ausgestellt. Dazu wurde ein sechs Meter spannender aus Foamglas© bestehender Bogen, mittels parametrischer Software digital entwickelt und vom institutseigenen Roboter gefräst.

Mit diesem Objekt fokussierte diese Arbeit auf zwei wesentliche Teilbereiche der zentralen Forschung: Zum einen stellt der Bogen eine der Schale gegenüber vereinfache Form statisch effizienter Formgebung leichter Tragwerke dar. Außerdem wird mit dem Fräsen der Kontaktflächen, die präzise Fertigung der trockenen Fuge und die automatische Erzeugung der notwendigen Werkzeugbahnen erstmalig praktisch thematisiert.



Abb. 2.4-1: Druckfestigkeitstests des verwendeten Materials Foamglas©

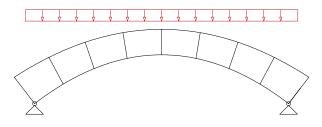


Abb. 2.4-2: statisches System eines parabolischen Bogens, unter Gleichstrechenlast belastet

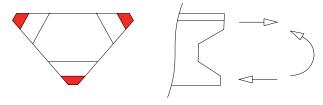


Abb. 2.4-3: Querschnitt des Bogens

#### Material

Foamglas© ist ein im Bauwesen eingesetztes Isolationsmaterial. Es kommt je nach Konfiguration aufgrund seiner im Vergleich zu herkömmlichen Dämmstoffen hohen Druckfestigkeit, in druckbeanspruchten Bereichen (z.B. befahrbaren Flachdächern) zum Einsatz<sup>69</sup>. Diese Eigenschaft und die schon erwähnte grundsätzliche Möglichkeit der zerspanenden Bearbeitung mittels Fräsen führten zur Materialwahl. Zur genauen Quantifizierung wurde die Druckfestigkeit des Materials mittel Druckmessungen von verschiedenen Querschnitten in Labortests ermittelt (Abb. 2.4-1). Die ermittelte Druckfestigkeit wurde mit 1.80N/mm² quantifiziert.

# Geometrie und statisches System

Damit ein Bogen aus der Sicht des Tragwerks als solcher funktioniert, ist grundsätzlich zu beachten, dass dieser nicht nur über seine Form allein, sondern auch über seine Lagerung definiert wird. Damit die Auftretenden Kräfte hauptsächlich als Normalkräfte und nicht als Biegemomente aufgenommen werden können, müssen die Auflager in der Lage sein die auftretenden Horizontalkräfte aufzunehmen. Sie werden daher in horizontaler Richtung unverschieblich ausgeführt. Für den RobArch wurden die Auflager verbindende Zugbänder fixiert, und das System so kurzgeschlossen.

Die Geometrie wird in zwei Bereichen betrachtet: global und im Detail (Abb. 2.4-3). Die globale

69 http://at.foamglas.com/de/waermedaemmung/produkte/produktuebersicht/foamglas platten/ Zugriff 10.09.2016

Geometrie ist ein parabolisch geformter Bogen. Wird ein solcher Bogen von einer Gleichstreckenlast belastet, verläuft die Stützlinie innerhalb des Bogenquerschnitts. Unter Gleichstreckenlast treten nur Druckkräfte und keine Biegemomente auf. Der Kräfteverlauf ändert sich entsprechend dem Verhältnis von Stützlinie zu Auflager. Je steiler der Winkel ist, desto größer sind die auftretenden Druckkräfte. Um dieses Verhältnis sichtbar zu machen, wurde ein Script geschrieben, welches den zweiten Teil die Ausbildung der Kontaktflächen behandelt (Abb. 2.4-4).

Durch eine Eingabe im Script wird der Bogen zuerst lotrecht zur Stützlinie segmentiert und an den Stirnflächen die auftretenden Druckkräfte unter der angegeben Last errechnet. Die ermittelte Druckfestigkeit kombiniert mit der auftretenden Druckkraft an den Stirnflächen der Bogensegmente führt zu einer Differenz der vorhandenen und der benötigten Kontaktfläche. Um diese tatsächlich benötigte Kontaktfläche des Bogens sichtbar zu machen, wird die berechnete Fläche in drei Unterflächen an den Eckpunkten des Querschnitts unterteilt. Der nicht benötigte Bereich wird mittels Fräsen entfernt und somit das Eigengewicht des Tragwerks reduziert.

Da das Material überaus spröde ist, wurde zum einen die Querschnittsgeometrie von einem Dreieck durch abfasen der Kanten auf ein Sechseck abgeändert, außerdem wurden die Kontaktflächen um jeweils 3mm zurückgesetzt und mit einem Chloropren-Kautschuk Layer geschützt. Dies erleichtert das Handling beim Zusammensetzten erheblich (Abb. 2.4-5 und -6).

Da das Material nur in den Maßen 450x400x150mm zur Verfügung stand, wurde ein Bogensegment aus drei Elementen hergestellt. Daher generiert das Script die Aussparungen so, dass sie ausschließlich in den beiden Randsegmenten vorkommen. Es wurden aber auch die Mittelsegmente beidseitig mittels Fräsen nivelliert und dann mit den Randsegmenten verklebt (Abb. 2.4-7).

Für eine zeiteffiziente Produktion der Bogensegmente wurde ein Hartmetallfräser mit einem Durchmesser von 40mm und flachem Fräskopf zur Herstellung gewählt. Daher mussten alle Oberflächen plan ausgeführt werden. Rundungen oder windschiefe Flächen wurden vermieden. So wurde aus der Konzeptgeometrie die abschließende Fabrikationsgeometrie (Abb.

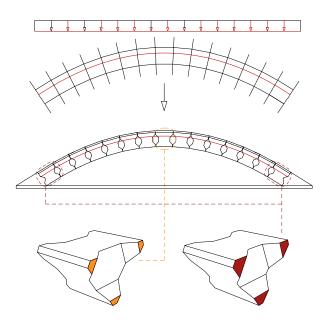


Abb. 2.4-4: Segmentierung und Berechnung der benötigten Kontaktflächen eines Bogens anhand von Geometrie (Parabel) und Lastfall (Gleichstreckenlast)

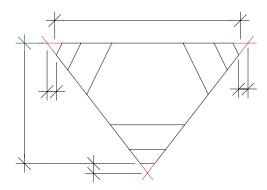


Abb. 2.4-5: Entfernen von scharfen Kanten zum Schutz des spröden Bauteils

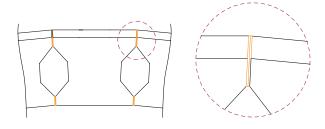


Abb. 2.4-6: Choloropen-Kautschuk Layer zum Schutz der Kontaktflächen

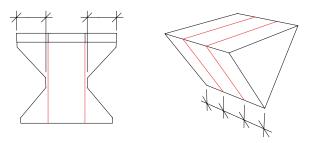


Abb. 2.4-7: Unterteilung eines Bogensegmentes in drei Abschnitte, dies definieren die maximale Frästiefe

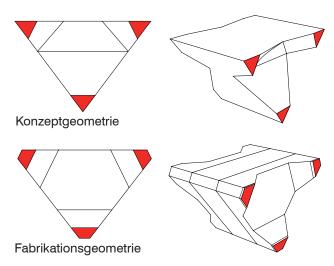


Abb. 2.4-8: Entwicklung der Bauteilgeometrie vom Konzept zur Fabrikation

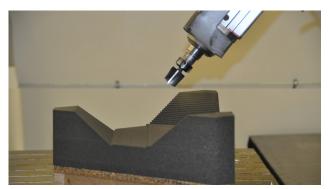


Abb. 2.4-9: Fräsen eines Segmentdrittels



Abb. 2.4-10: Aufbau des Bogens Vorort

2.4-8).

### Produktion

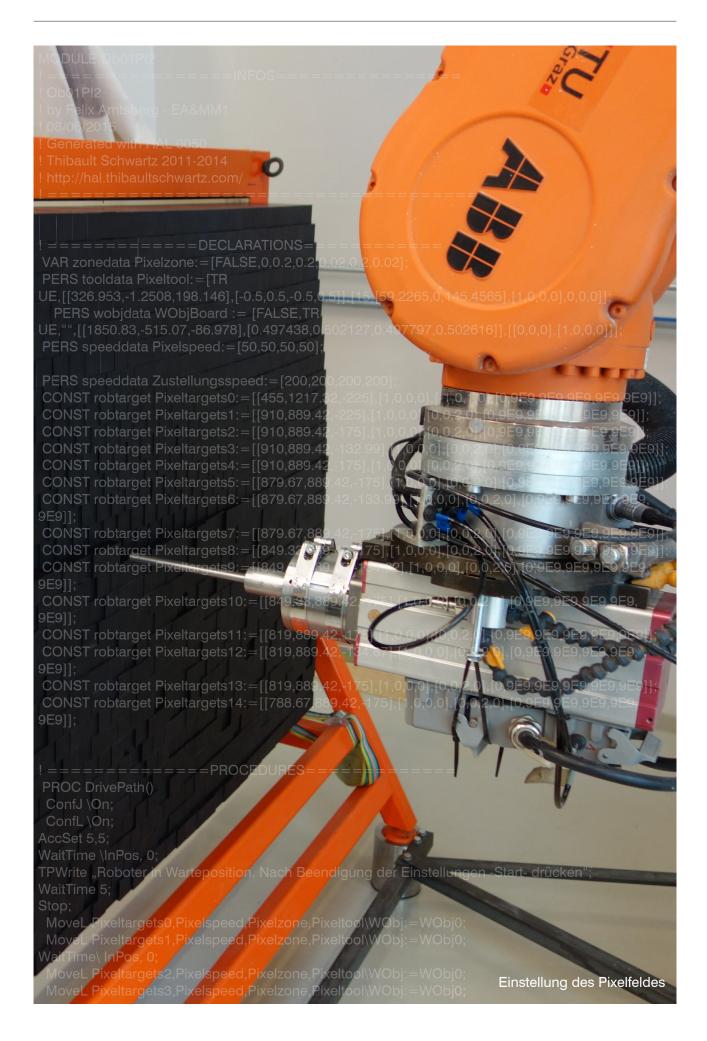
Mit diesem Projekt wurde erstmalig die am Institut installierte digitale Prozesskette von der parametrischen Geometrieerzeugung mittels Grashopper©, der Fräspfaderstellung mittels Hypermill© und der Übersetzung in einen vom ABB IRB 6660 Roboter verarbeitbaren Maschinencode durch das Programm PI-Path© umgesetzt. Der Prozess wurde zwar in Roughcut und Finecut unterteilt, aber mit dem gleichen Werkzeug ausgeführt (Abb. 2.4-9).

Aufbau und Conclusio (Abb. 2.4-10 und -11) Der Aufbau des Exponats vor Ort hat die Schwierigkeiten einer so toleranzarmen Bauweise offengelegt. Bodenunebenheiten, die von den Auflagern ausgeglichen werden mussten oder das Setzen eines Schlusssteins, der praktisch kein Spiel hat, sind nur zwei Beispiele die veranschaulichen, dass eine so exakte Fertigung der Bauteile, und ein daraus resultierende praktisch fugenlosen Bauweise, die in der maschinellen Vorfabrikation erreichbar sind, sind nicht Aufwandslos auf die Baustelle selbst übertragen werden können; selbst bei einfachen Prinzipien wie einem nur in einer Richtung spannenden und kontinuierlich verlaufenden Bogen. Die Fügung von komplexeren Schalen- und Freiformgeometrien stellt somit voraussichtlich eine gesteigerte Herausforderung an die Fügung der Einzelelemente zu einem Gesamtkonstrukt.









# 3. Adaptive Herstellung von doppelt gekrümmten UHPC-Schalen

# 3.1 Das Pixelfeld und seine Ansteuerung

# **Einleitung**

Das folgende Kapitel behandelt die Transferierung einer Geometrie in eine von einem Industrieroboter ausführbare Ansteuerungsdatei (Abb. 3.1-1). Zu diesem Zweck wird zuerst das Konzept des ausformulierten Schaltisches und seine für die Ansteuerung relevanten Eigenheiten beschrieben. Das daraus generierte parametrische Script und seine Einbindung in die digitale Prozesskette bilden den zweiten Teil, der auch auf die genauen Spezifikationen eingeht. Abschließend werden noch Transfer, Überprüfung und Ausführung betrachtet.

### Aufbau des Schaltisches "Pixelfeld"

Der Aufbau des Schaltisches basiert auf einem quadratischen Feld mit einer Kantenlänge von 900 x 900 mm, das von einer lückenlosen Anordnung von insgesamt 915 Pixeln befüllt wird.

Die Pixel haben grundsätzlich ein Querschnittsmaß von 30 x 30 mm, und füllen somit eine Reihe mit 30 Pixel auf, werden aber in jeder zweiten Reihe um einen halben Pixelabstand versetzt angeordnet und am Start- und Endpunkt der Reihe durch einen halbierten Pixel ergänzt.

So entsteht eine gerasterte Anordnung in einem Verband von 30 untereinanderliegenden horizontalen Reihen zu abwechselnd 30 und 31 Pixeln, die, wenn sie durch den Roboter verschoben wurden, via Klemmen fixiert werden können. Die Gesamtlänge der Pixel beträgt 400 mm. Diese Pixel werden nun, jeweils durch einen Punkt repräsentiert, auf die einzustellende Form projiziert und durch eine Distanzmessung, zwischen Nullposition und dem projizierten Punkt der Verfahrweg eines jeden

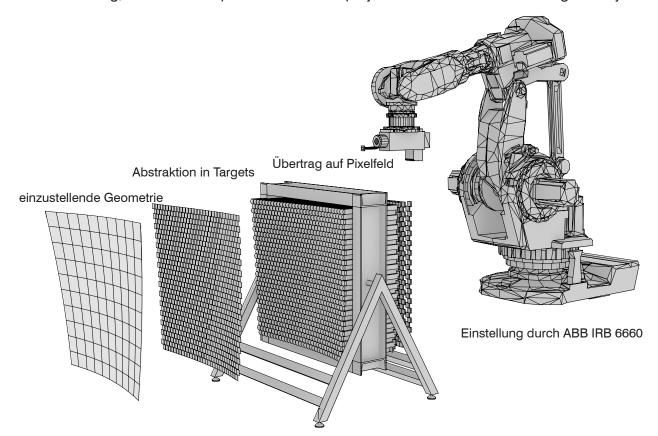


Abb. 3.1-1: Abbildung einer Geometrie durch das Pixelfeld, Einstellung erfolgt durch den Roboter





Abb. 3.1-2: Einstellung eines Objektes mit variierendem (oben) und konstantem Radius (unten)

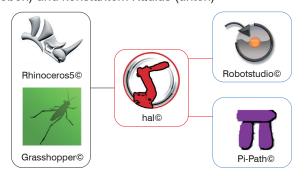


Abb. 3.1-3: Digitale Prozesskette von der Geometrieerzeugung zum Maschinencode

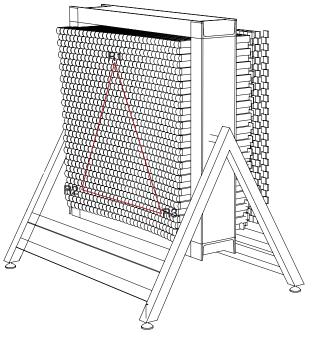


Abb. 3.1-4: Die drei Referenzpixel werden immer in der gleichen Höhe eingestellt und bilden die Referenz

Pixels berechnet. Für die Einstellung wird dieser Zielpunkt dann durch einen Vektor ergänzt und so in ein Target umgewandelt. Ein so definierter Zielpunkt kann mithilfe eines Inverse Kinematics-Solvers (ein Algorithmus zur Berechnung der Achsdrehung eines Industrieroboters auf Grundlage der Position des Zielpunktes relativ zur Roboterbasis) von einem 6-Achs-Roboter angesteuert werden.

Als Führung im Rahmen, und um ein Durchrutschen der Pixel sicher zu unterbinden und eine Fixierung in der Position zu ermöglichen können die Pixel reihenweise von einem Klemmmechanismus verspannt und in Position gehalten werden. Diese konstruktiven Maßnahmen begrenzen den maximalen Verfahrweg auf 150 mm

### Einstellmöglichkeiten und -grenzen

Rechnet man den einstellbaren Stich auf einen konstanten Krümmungsradius einer Kugelkalotte um, so lässt sich ein kontinuierlicher Krümmungsradius von 1,44 Meter erreichen. Bei einer einfachen Krümmung beträgt dieser 0,757 Meter. Eine solche Angabe ist selbstverständlich nur eine unvollständige Kenngröße und kann weder Potential noch Restriktionen des Systems ausreichend beschreiben (Abb. 3.1-2). Denn zum einen lassen sich partiell selbstverständlich noch kleinere Radien realisieren (wie auch in einem Folgeprojekt schon erfolgreich umgesetzt), des Weiteren trägt eine solche Berechnung weder Neukonfigurationen des gleichen Prinzips noch weiteren Einflussfaktoren wie beispielsweise der verwendeten Schalhaut Rechnung. Sie dient nur als Orientierungshilfe im Kontext der verschiedenen Entwicklungen anderer forschenden Einrichtungen.

# Die Umwandlung einer digitalen Geometrie in ein Ansteuerungskonzept

Die Aufgabe des hier beschriebenen Scripts ist die Übernahme von dem Schaltisch produzierbaren Geometrien und die Transformation der geometrischen Informationen zu einem Maschinencode.

Die dazu genutzte Plattform ist wieder der auf Rhinoceros5© basierende graphische Algorithmengenerator Grasshopper©. Als Postprozessor zur Erzeugung des Maschinencodes fungiert das von Thibault Schwartz entwickelte Plug-In HAL© (Abb. 3.1-3).

Der Prozess kann in folgende Arbeitsschritte unterteilt und beschrieben werden:

Orientierung des Werkstücks auf dem Pixeltisch Um eine konstante Referenz für die Orientierung der einzustellenden Platten zu schaffen, sind drei Pixel (im folgenden Referenzpixel genannt) speziell ausgeführt (Abb. 3.1-4 und -5).

Über dieses Hilfsmittel erfolgt die weitere Referenzierung und Ausrichtung sowohl der Sandformen, als auch später der Betonbauteile (Abb. 3.1-6).

Alle einzustellenden Geometrien werden vom entwickelten Script so ausgerichtet, dass die Referenzpixel die gleiche Einstellungstiefe erfahren. Das aus diesen Punkten entstehende virtuelle Dreieck bildet die Basis für weitere Orientierungen. Sowohl für das spätere Messen der Abweichungen, als auch für die Aufspannung bei der weiteren Bearbeitung der Kontaktflächen.

Diese Ausrichtung hat zwei Nachteile gegenüber einer Methode, welche die Geometrien in der flachst möglichen Ausrichtung orientierten würde. Zum einen reduziert sich das Einstellungspotential, die benötigte Materialmenge zur Abnahme Sandform erhöht sich. Dafür ermöglicht diese Ausrichtungsform aber das Aufspannen aller Bauteile auf der gleichen Aufspannvorrichtung bei der Nachbearbeitung. Das Formatieren der Platten mittels Nassbearbeitung kann also ohne ein zusätzliches Nachjustieren ausgeführt werden.

Unterteilung des Pixeltischs in einen Verband von 915 Pixeln

Während der Planungsphase wurden verschieden Varianten und Pixelanordnungen angedacht und getestet. In seiner abschließenden Version unterteilt das Script das Feld in 915 Pixel. Über eine Punktprojektion und anschließende Abstandsmessung wird der Verfahrweg aller Pixel ermittelt.

Abstandsmessung auf 13 Punkten pro Pixel

Eine Messung des Abstandes mittels einer Projektion des Pixelmittelpunktes auf die einzustellende Geometrie ist sehr ungenau, da der tatsächliche Berührungspunkt mit einer gekrümmten Fläche meist davon abweicht. Da eine Berechnung des tatsächlich kürzesten Verfahrweges aber aufwändig und bei 915 kugelförmigen Geometrien rechenintensiv ist, wurde hier ein vereinfachendes Verfahren entwickelt und angewendet.

Die kugelförmigen Köpfe werden in 13 Punkte unterteilt und Abstandsmessungen entlang der Z-Achse all dieser Punkte zur Einstellungsgeo-

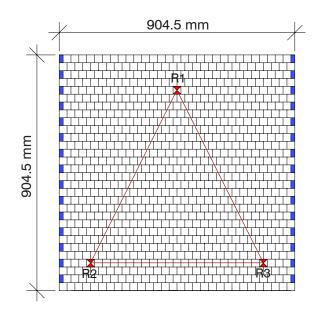


Abb. 3.1-5: Pixelfeld bestehend aus 882 vollen, 30 halben und 3 Referenzpixeln

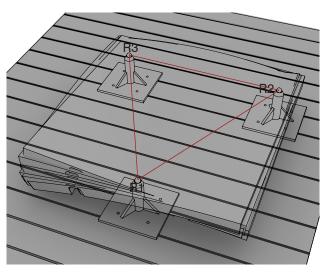


Abb. 3.1-6: Ausrichtung aller Schalenelemente über die drei Referenzpunkte auf dem Aufspanntisch

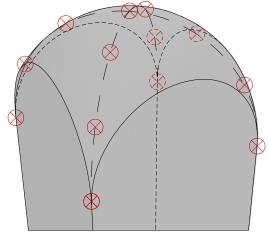


Abb. 3.1-7: Unterteilung eines Pixels in 13 Punkte zur Abstandsmessung und anschließender Einstellung

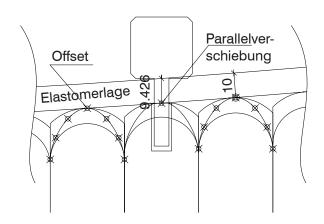


Abb. 3.1-8: Pixelverschiebung über Offset und Parallelverschiebung



Abb. 3.1-9: Das Verschiebewerkzeug

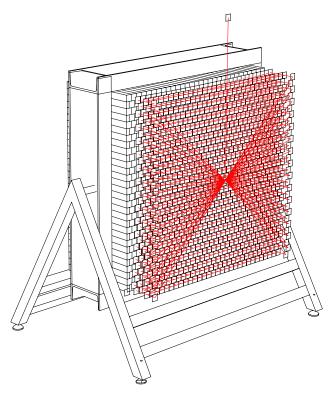


Abb. 3.1-10: Toolpath (rot) einer kompletten Ansteuerung

metrie vorgenommen (Abb. 3.1-7). Der kürzeste Abstand wird gewählt und zur Einstellung verwendet. Somit werden insgesamt 11779 Punkte zur Berechnung der Einstellung verwendet und der mögliche Fehler reduziert sich deutlich.

### Offset und Parallelverschiebung

Die Pixel werden nicht direkt auf das von der Geometrie vorgegebene Maß eingestellt, sondern beziehen sich auf die Geometrie plus die zwischengelegte Elastomermatte (in diesem Fall 10 mm). Eine Offset-Funktion versetzt die ursprüngliche Fläche um die gewünschte Distanz.

Eine Ausnahme bilden die Referenzpixel. Da diese exakt positioniert werden müssen, beziehen sich die Einstellwerte auf die Originalgeometrie. Der ermittelte Wert wird konstruktionsbedingt mit 9,426 mm in Form einer Parallelverschiebung angegeben (Abb. 3.1-8).

### **Erstellung des Maschinencodes**

Damit aus den geometrischen Informationen des einzustellenden Objektes ein Maschinencode erstellt werden kann, müssen diese als Vektoren mit einer Orientierung (im Folgenden Targets genannt) beschrieben und dann in eine logische Abfolge gesetzt und mit weiteren Informationen ergänzt werden.

### Das Verschiebewerkzeug

Das Werkzeug zur Einstellung des Pixeltisches ist ein in der Frässpindel eingespannter und eingemessener 209,5 mm langer und 12 mm im Durchmesser messender Stab der in die im System integrierte und präzise eingemessene Frässpindel des Roboters eingesetzt wird (Abb. 3.1-9). Der für die Erstellung des Maschinencodes wichtige Toolcenterpoint lässt sich somit leicht definieren. Das Werkzeug ist aber somit ausschließlich zum Schieben und nicht zum Ziehen geeignet.

# Erstellung des Werkzeugpfads

Die Einstellungsbewegung des Roboters ist eine Bewegung des Verschiebewerkzeugs in Z-Richtung des Pixelfeldes. Die Eingangsinformation zur Werkzeugpfaderstellung ist über die 915 generierten Targets der einzustellenden Form vorhanden, die auch automatisch die Zieltargets darstellen (Abb. 3.1-10).

Zur Einstellung wird davon ausgegangen, dass alle Pixel auf Einstellungstiefe Z=0 mm stehen, und somit der maximale Verfahrweg von 150

mm zur Verfügung steht. Um den Verfahrweg so gering wie möglich zu halten, aber eine Einstellung eines jeden Pixels zu gewährleisten, wird die Zielgeometrie aber nicht so platziert, das die geringste Einstellung 0 mm sondern 2 mm beträgt. Damit ist die maximale Einstellungstiefe auf 148 mm begrenzt.

Die zur Distanzberechnung des Einstellweges verwendeten Targets auf Höhe Z=0 mm, werden auf Z=-25 mm verschoben und somit das Eingangs- und als Kopie das Ausgangstarget erstellt.

Die Einstellungsabfolge (Abb. 3.1-11 bis -14) Grundsätzlich besteht eine Einstellung aus drei Schritten, die für das gesamte Pixelfeld gleich sind:

- Eingangsposition Einstellung (Offset der Basisfläche um 25 mm)
- Einstellungsposition
   (Projektion auf die Zielgeometrie)
- 3. Ausfahrtsposition Einstellung (Kopie Eingangsposition)

### Einfahrt und Ausfahrt

Die Einstellung erfolgt Reihe für Reihe oben beginnend in S-Schleifen. Zu Beginn einer jeden Reihe wird ein Einfahrtstarget erstellt und zum Ende ein Ausfahrtstarget. Nach jeder eingestellten Reihe fährt der Roboter zuerst zentral vor und anschließend nach oben aus dem Arbeitsbereich und wartet auf einen neuen Startbefehl.

Einnahme einer sicheren Warteposition nach jeder eingestellten Reihe

Da das Klemmen der eingestellten Reihen über Verschraubung von Hand erfolgt, wird der Roboter nach Beendigung einer jeden Reihe in ein Warteposition gefahren und wartet auf einen erneuten Startbefehl, der vom Nutzer über das Flex Pendant eingegeben wird.

## Roboterkonfiguration

Damit die Geometrie vom Roboter eingestellt werden kann, muss dieser mit seinen Spezifikationen im Programm definiert werden. Dazu gehört der Arbeitsbereich, der sich durch die geometrischen Spezifikationen der Maschine selbst, also den Achsabstand der sechs Achsen zueinander, der möglichen Drehung dieser Achsen und eventueller externer Achsen, der relativen Position und Orientierung zum Workobject und Nutzung der Verfahrachse definiert, und die geometrischen Daten des genutzten Endeffektors. Mittels dieser Informationen berechnet der

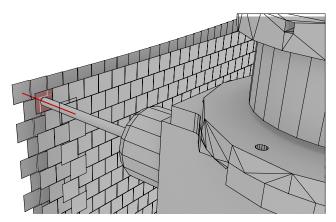


Abb. 3.1-11: Eingangsposition Target 01

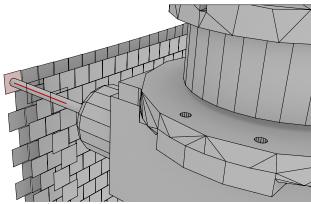


Abb. 3.1-12: Einstellungsposition Target 01

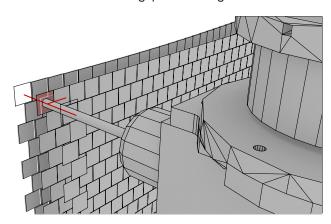


Abb. 3.1-13: Ausfahrtsposition Target 01

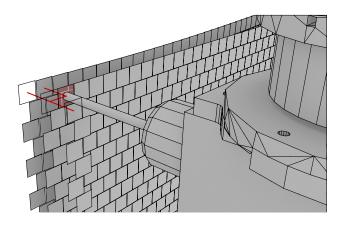


Abb. 3.1-14: Eingangsposition Target 02

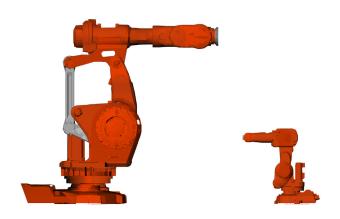


Abb. 3.1-15: Die beiden Roboter für die das Script geschrieben wurde (ABB IRB 6660 und IRB 140)

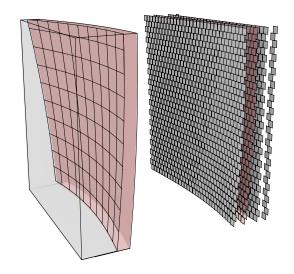


Abb. 3.1-16: Versatz der Einstellungsdateil (alt rot) und daraus resultierende Sandersparnis

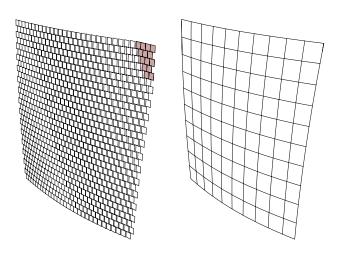


Abb. 3.1-17: Ersetzen der Pixel einer Geometrie mit einem Stich >150 mm durch den maximalen Verfahrweg

IK-Solver (IK= Inverse Kinematics) die Achskonfiguration und somit die Achsstellung für jedes Target (Abb. 3.1-15).

Weitere benötigte Informationen, auf die an dieser Stelle nicht genauer eingegangen wird, sind Bewegungsart (Motion), Geschwindigkeit (Speed), und Genauigkeit (Zone).

## Zusätzliche Aufgaben des Scripts

Abgesehen von den zur Einstellung in jedem Fall benötigten Informationen, wurden in diesem Script noch einige weitere Programmpunkte eingefügt, sei es als Schutzmechanismus, zur Materialersparnis oder zur Simulation. Diese Punkte werden nachfolgend aufgelistet und erklärt.

Optimierungsverfahren der Einstellung zur Sandersparnis

Zur Abnahme der Sandformen wurden zwei unterschiedliche Rahmen vorgesehen. Ein Rahmen für Bauteile mit einem Stich von >110 mm und der zweite für Bauteile mit geringem Stich von <110 mm.

Die ursprüngliche Variante des Scripts sah vor, den Verfahrweg so gering wie möglich zu halten. Die minimale Einstellung eines Pixels betrug immer genau 2 mm.

Da dies aber bei den meisten Bauteilen zu einem ungewünscht hohen Sandverbrauch führte, wurde das Bauteil für die Berechnungen des Verfahrweges reorientiert. Um die benötigte Sandmenge möglichst gering zu halten, aber eine mindestdicke von 40 mm zu gewährleisten wird die Einstellung gemäß der Rahmentiefe < 110 mm und > 110 mm sortiert und dann automatisch an die Rahmentiefe angepasst (Abb. 3.1-16).

Die minimale Materialstärke der Sandform beträgt (so weit möglich) immer 40 mm.

Anmerkung: Dieses Verfahren wurde später entwickelt und bei den Sandformen für Platte 1, 2, 7, 8 und 9 angewendet.

Ersetzen aller zu hohen Einstellungen durch den maximalen Verfahrweg von 150/148 mm

Wird eine Geometrie zur Einstellung geladen, die den maximalen Verfahrweg des Pixelfeldes überschreitet, reagiert das Script mittels eines geschriebenen Schutzmechanismus. Dieser kontrolliert automatisch den Verfahrweg alle 915 Pixel. Überschreitet einer dieser Pixel den möglichen Einstellbereich von 150 mm (dieser variable Wert wurde zur Sicherheit für die Praxis noch einmal auf 148 mm reduziert), wird dieser Wert automatisch auf den Maximalwert eben 148 mm korrigiert. Somit ist eine Verschieben über die Grenzen ausgeschlossen und damit die unter Umständen auftretende Beschädigung des Formtisches. Dieses Verfahren kam beispielsweise bei der Herstellung der Sandform für Platte 8 zum Tragen (Abb. 3.1-17).

Simulationsvorbereitung für Robotstudio und Pl-Path (Abb. 3.1-18 und -19)

Die Ansteuerung des Roboters im RDL-Labor durchläuft eine andere Prozedur, da sie auf einer speziellen Prozesskette basiert, die sich von der Prozesskette im ABB-Labor unerscheidet. Der m RDL-Labor verwendete Postprozessor Pl-Path arbeitet am Workobject orientiert, Robotstudio hingegen an der Roboterbasis. Um eine digitale Simulation der Einstellung vornehmen zu können und gleichzeitig eine Weitergabe der Daten an Pl-Path zu ermöglichen, wurde der letzte Abschnitt des Scripts zweimal verfasst: einmal orientiert an  $X=0.0,\,Y=0.0,\,Z=0.0$  für die Simulation in Robotstudio und einmal ausgerichtet auf den Workobject Centerpoint  $X=0.0,\,Y=0.0,\,Z=0.0$ .

# Transfer, Überprüfung und Ausführung

Der Transfer des Maschinencodes erfolgt durch Kopieren der Textdatei in Grasshopper© und anschließender Speicherung mit der Endung "\*.mod". Dieses File kann nun entweder direkt vom Controller des Roboters gelesen werden oder durch die Simulationssoftware Robotstudio© noch einmal überprüft werden. Somit können semantische Fehler, aber auch Singularitäten und unerreichbare Targets identifiziert und durch Repositionierung des Roboters auf der Linearachse korrigiert werden.

Anmerkung: Für die Anlage im RDL-Labor wurden die mod.files mittels PI-Path kontrolliert und die auf dem Programm basierende Bahnenkorrektur an die Maschine angepasst.

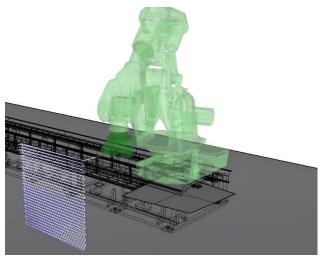


Abb. 3.1-18: Werkzeugpfaderzeugung und Simulation in Rhinoceros unter der Nutzung von HAL

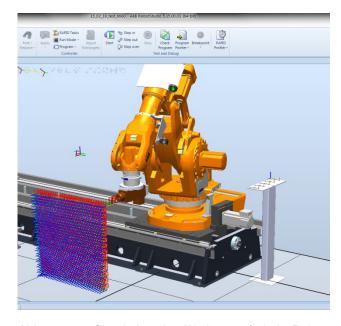


Abb. 3.1-19: Simulation des Werkzeugpfads in Robotstudio

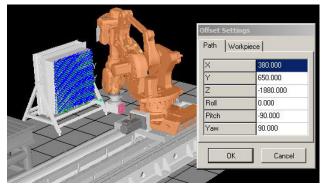
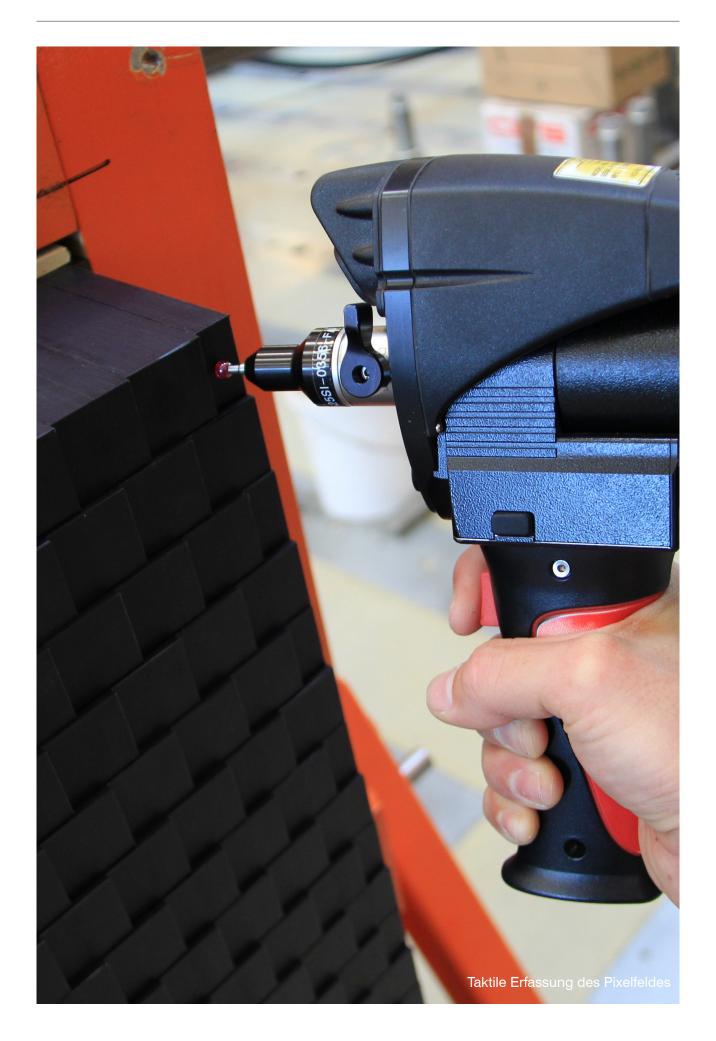


Abb. 3.1-20: Simulation des Werkzeugpfads unter der Nutzung von PI-Path



# 4. Ergebnisse und Auswertungen

# 4.1 Messprozeduren und Datenerfassung

### Messprozeduren, Datenerfassung und Auswertung

Anmerkung: Im Hauptteil der Arbeit werden mit den Bauteilen 1 und 5 die Messungen exemplarisch dargestellt, für die Zusammenfassung aber die Ergebnisse aller Messungen genutzt. Die gesamten Messsdaten werden im Appendix aufgeführt.

Während des gesamten Herstellungsprozesses wurden Messungen, sowohl der Einstellungen des Pixeltisches als auch der Formsandschalungen und der hergestellten Betonbauteile durchgeführt. Die Messungen erfolgten mittels eines Romer© Messarms, der sowohl taktile als auch berührungslose Messverfahren mittels Laserscan ermöglicht. Diese Messungen dienten der Kontrolle der Prozesssicherheit, der Erkennung von Fehler- und Verlustquellen der Genauigkeit, und einer Ableitung für eine Optimierung des Herstellungsprozesses.

### Beurteilungskriterien und Skalierung

Die Kriterien zur Beurteilung von Formgenauigkeit und Maßhaltigkeit beziehen sich auf zwei Faktoren. Zum einen die Wiederhohlgenauigkeit des verwendeten Industrieroboters und die definierten Anforderungen, beruhend auf vorangegangenen Forschungsarbeiten seitens des Labors für konstruktiven Ingenieurbau. Die Toleranzen der Kontaktfläche wurden in Vorgesprächen mit ca.  $\pm 0.20-0.25$ mm angegeben. Die Wiederhohlgenauigkeit des verwendeten Roboters wird ab Werk mit 0.11mm angegeben, allerdings ohne die im am Institut installierte Linearachse miteinzubeziehen. Eine Wiederhohlgenauigkeit von  $<\pm 0.25$ mm erscheint auf Grundlage von Vorerfahrungen erreichbar, weshalb hier dieser Wert bei den Kontaktflächen anzustreben ist und als nomineller Toleranzwert in der Skala angegeben wird,  $<\pm 1.00$ mm als kritischer Toleranzwert. Für die Sichtflächen wird aufgrund des komplexeren Fertigungsprozesses eine Formgenauigkeit vom  $<\pm 0.50$ mm als möglich angesehen. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Prozesse bleibt die Skala bei  $<\pm 0.25$ mm und  $<\pm 1.00$ mm.

Folgende Geometrie-Messungen wurden dafür durchgeführt:

- Erfassung des Pixeltisches vor und nach dem Abformen (taktile Messung)
- Sandformen (LaserScan)
- Betonbauteile nach den Schleifarbeiten (LaserScan)
- Elastomermatten zu Auflage auf den Pixeltisch
- Aufgebautes Mock-Up (verschiedene Messverfahren)

In den folgenden Abschnitten wird auf die Grundlagen der verwendeten Messtechnik eingegangen. Im zweiten Teil werden die Messverfahren selbst im Detail erklärt und auf digitale und reale Unschärfen der Messergebnisse und ihre Einflussfaktoren eingegangen; anschließend auf Abweichungen in der Formgenerierung und Formatschleifen.

Der Messbericht präsentiert die Messergebnisse und Auswertungen und gibt ein abschließendes Resümee und einen Ausblick auf weitere Tätigkeiten.



Abb. 4.1-1: Messarm zur Geometrieerfassung neben dem Bauteil platziert



Abb. 4.1-2: Erfassung eines einzelnen Punktes mittels des taktilen Aufnahmeverfahrens

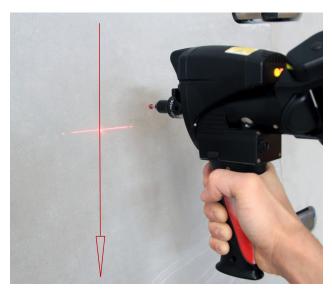


Abb. 4.1-3: Erfassung einer Punktwolke mittels des visuellen Aufnahmeverfahrens



Abb. 4.1-4: Darstellung einer gemessenen Punktwolke in Geomagic Control  $\ensuremath{\mathbb{C}}$ 

### Grundlagen zur Messtechnik

### Messgerät

Als Messgerät fungiert ein portabler Romer 7525 SI Absolute Messarm© mit integriertem Scanner der in der Lage ist, sowohl über ein Tastsystem also taktil, als auch über einen Laser-Scanner und somit visuell Daten zu erfassen. Er erlaubt das Arbeiten in einem Messbereich von 2,50 m, mit einer Abtastpunkt-Reproduzierbarkeit von ± 0.027 mm und einer volumetrischen Abtastgenauigkeit von ± 0.038 mm. Der integrierte Scanner RS3 ermöglicht eine Erfassung von 460000 Punkten pro Sekunde, bei einer Zeilenfrequenz von 100 Hz und 4600 Punkten pro Zeile (48-85 mm Zeilenbreite). Die Scan-Genauigkeit beträgt 0.079 mm, der minmale Punktabstand 0.014mm<sup>70</sup> (Abb. 4.1-1).

### Datenerfassung taktil

Die taktile Messung erfolgt über das Abtasten der Werkstückoberfläche mit einer wechselbaren Tastspitze. Der zu erfassende Punkt wird von diesem in der Regel kugelförmigen Taster berührt und über den Auslöser ein einzelner Punkt aufgenommen. Das Programm das zur Datenerfassung gewählt wird, ist Geomagic Control©. Für die Auswertung wurde ein Grasshopper© Script geschrieben, welches die erfassten Punkte im .dxf-Format übernimmt. Diese Messmethode bietet den Vorteil, dass pointiert nur die notwendigen Informationen erstellt werden und verarbeitet werden müssen. Die Informationsaufnahme selbst ist aber relativ langsam (Abb. 4.1-2).

### Datenerfassung visuell

Das Programm, das sowohl zur Datenerfassung als auch zur Auswertung verwendet wurde ist Geomagic Control©. Die visuelle Erfassung unter Zuhilfenahme des integrierten Scanners, erfolgt durch das Abfahren eines Objektes in nebeneinanderliegenden Bahnen in einem Abstand von 50-150 mm. Die Messeinheit wird dabei immer normal zur Oberfläche geführt. Durch die zeitlich getaktete fortwährende Aussendung und Aufnahme eines linienförmigen, aber in Einzelpunkte unterteilte Lasersignals (Abb. 4.1-3), wird Zeile pro Zeile erfasst und dadurch eine Punktwolke generiert, die das gewählte Objekt digital abbildet.

70 http://hexagonmi.com/products/portable-measuring-arms/romer-absolute-arm-with-integrated-scanner, Zugriff: 14.05.2016

### Messprogramme zur Auswertung

### Messprogramm taktil

Die grundsätzlich einfache Struktur, der zu verarbeitenden Information, einer Punktwolke mit 915 Punkten und die daraus resultierende leichte Verarbeitung dieser, hat zu einer Planung eines eigenen Grasshopper© Scriptes geführt, das zur Auswertung der gemessenen Daten genutzt wird.

Die mit dem Messarm ertasteten Punkte werden dazu in Geomagic Control® als \*.dxf Datei abgespeichert (Abb. 4.1-4) und in das Grasshopper ® Script importiert.

Die erfassten Punkte werden auf Redundanzen untersucht und gesäubert. In der Regel handelt es sich hierbei um selten auftretende Doppelpunkte, die durch eine unabsichtliche Wiederholung des Auslösers entstehen können. Nun werden die gemessenen Punkte, die noch unreferenziert im Koordinatensystem liegen über eine 3-Punkt Orientierung an den digitalen Originalen ausgerichtet (Abb. 4.1-5). Als Referenz fungieren hierbei die drei Punkte der Referenzpixel.

Um die Soll-Einstellung mit der Ist-Einstellung vergleichen zu können, werden die im Einstellungsscript erstellten Targets als Punkte geladen und zu quadratischen Flächen mit einem Maß von 30 x 30 mm umgewandelt. Dies geschieht, da die taktile Messung der eingestellten Pixel nicht exakt mittig auf der Pixelfläche erfolgen kann. Eine Distanzmessung von gemessenem Punkt zu digitaler Referenz wäre daher größer als die tatsächlich erfolgte Abweichung in Form einer zu geringen oder zu hohen Einstellung in z-Achse (Abb. 4.1-6). Auf die erstellte Fläche können die Punkte nun projiziert werden und die tatsächliche Differenz gemessen werden.

Um auch gleich eine grafische Darstellung zu bekommen, wird eine Linie zwischen diesen beiden Punkten erzeugt und ein zylindrischer Körper erzeugt (Abb. 4.1-7 und -8).

Die ermittelten Abstände werden gezählt, in positive und negative Werte unterteilt und gelistet. Eine weitere Unterteilung und farbliche Kennung erfolgt anschließend in den verschiedenen Layern.

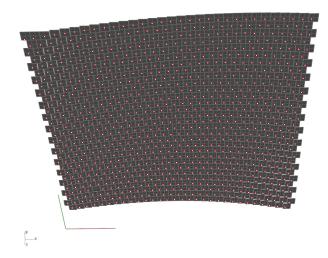


Abb. 4.1-5: Orientierung und Überlagerung der Punkte mit den Referenzflächen zur Distanzmessung

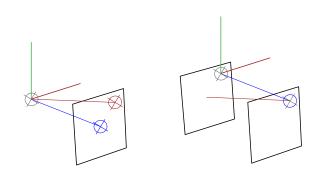


Abb. 4.1-6: gewünschte Distanzmessung exakt in z-Achse (blau), real erfasste Distanz (rot) und die Korrektur durch Projektion auf eine Fläche gleich dem Pixel

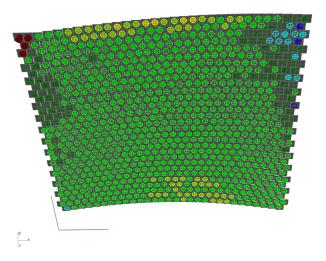


Abb. 4.1-7: Abstandsmessung und Darstellung in Farbe und Geometrie

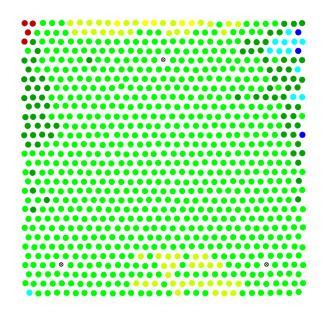


Abb. 4.1-8: Finale Darstellung der Messungen eines eingestellten Pixelfeldes in Rhinoceros 5.0 ©

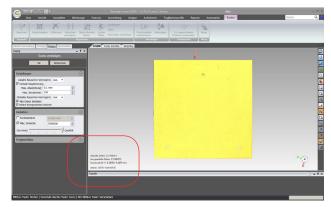


Abb. 4.1-9: Der Scan als Punktwolke

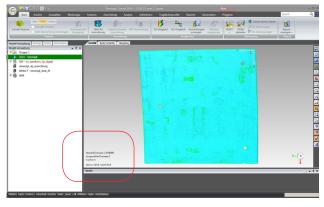


Abb. 4.1-10: Reduktion der Punktwolke auf <2.5 Mio Polygone

## Messprogramm visuell

Zur Messung und Analyse der deutlich komplexeren visuell erfassten Daten wird Geomagic Control© verwendet.

Als erstes wird die in Rhinoceros© erzeugte Geometrie als .iges gespeichert und im Programm als Referenz geladen (Anzahl der Polygone: 400000, Abb. 4.1-9). Die Messung, aktuell noch eine Punktwolke von ca. 25 Mio. Punkten (Abb. 4.1-10), wird von dem Objekt nicht zugehörigen und redundanten Punkten gesäubert und in ein Polygonnetz umgewandelt. Die Anzahl der Polygone wurde zur weiteren Verarbeitung in den folgenden Prozessen auf 2,5 Mio. Polygone pro Seite begrenzt (Abb. 4.1-11). Das entspricht ca. 300 Polygonen pro cm<sup>2</sup>. Dieser Kompromiss ermöglicht eine einigermaßen effiziente Handhabung der Objekte unter den zur Verfügung stehenden Rechenleistungen, bei gleichzeitig angemessener Auflösung zur Ermittlung der Abweichungen.

Je nach Objekt, das analysiert werden soll, wird ein Objekt, zum Beispiel das digitale Original, als Referenz deklariert, und das zu analysierende Objekt über verschiedene Techniken an diesem orientiert. Die anschließende Messung erfolgt automatisch und kann in verschiedensten Varianten kenntlich gemacht werden.

Anmerkung: Art der Ausrichtung, Messung und Varianten, werden im Kapitel Messung passend zum speziellen Objekt erläutert.

### Messung

Erfassung der Einstellung des Pixeltisches Die erste Messung dient zur Analyse der Einstellgenauigkeit des Roboters, also der Ermittlung der Differenz zwischen digital generiertem Werkzeugpfad und der realen Einstellung. Sie wird taktil, also über das Erfassen jedes einzelnen Pixels mittels Kontakt von 3D-Taster des Messarms und der Pixelrückseite durchgeführt. Die zweite Messung erfolgt noch einmal vom Pixeltisch in gleicher Art wie Messung 1, allerdings nach dem Abnehmen der Sandform. Sie dient zur Überprüfung eventueller Verschiebungen einzelner Pixel oder der gesamten Fläche, die aufgrund der einwirkenden Kräfte beim Abnehmen der Sandform entstanden sein könnten. Somit wird ermittelt, ob die aufgebrachte Vorspannung beim Klemmen der Pixel ausreichend ist und die Reibung der Pixel untereinander überall hochgenug ist, um nicht verschoben zu werden (Abb. 4.1-12).

Anmerkung: Diese Messung zeigte keine Auffälligkeiten.

### Erfassung der Sandformen

Die Messung der Sandformen dient der Analyse der Abformgenauigkeit von Pixeltisch auf Formsand, also der Differenz zwischen Pixeltisch, der 10 mm starken Elastomermatte und der hiervon abgenommenen Sandform (nachfolgend 3p-Sandform genannt). Die Messung erfolgt nachdem die Sandform vom Pixeltisch abgenommen wurde, und erfolgt visuell durch Scannen der liegenden oder stehenden Sandform (Abb. 4.1-13). Diese lässt sich in einem Vorgang erfassen. Die Erfassung ist in einem Arbeitsschritt möglich; ein Neupositionieren des Messarms oder der Form ist nicht erforderlich.

Die Ausrichtung der gescannten Elemente erfolgt bei der vom Pixeltisch erstellten Sandform über die drei Referenzpunkte.

Die vierte Messung dient der Analyse der Abformgenauigkeit von Formsand-Referenz auf Formsand-Offset. Zur Erstellung dieser Sandform werden mehrere Elastomermatten mit einer Gesamtdicke von 50 mm auf die ausgehärtete Sandform "Referenz" gelegt und im gleichen Verfahren die neue Form und somit Konterschalung abgenommen.

Die Arbeitsschritte, vom Scannen bis zur Analyse sind grundsätzlich mit dem Vorgang bei der ersten Sandform ident. Eine Ausnahme bildet die Ausrichtungsmethode. Da auf dieser Seite keine Referenzpunkte vorhanden sind erfolgt die Ausrichtung über die Best-fit Methode.

### Erfassung der Betonbauteile

Die beidseitige Messung der Betonbauteile ist aufgrund der Reichweite des Sensors, nicht mehr in einem Arbeitsschritt möglich und erfolgt daher durch visuelle Erfassung des liegenden Bauteils in zwei Abschnitten (Abb. 4.1-14). Die obenliegende Seite wird gescannt, und hierbei der erfassbare Teil der Stirnseiten/Kontaktflächen und der Rückseite mitaufgenommen. Anmerkung: Auf einen Bocksprung also ein Versetzen des Scangerätes, während des Prozesses, wird nach Möglichkeit verzichtet. Nach Erfassen der Oberseite wird das Bauteil selbst auf die Rückseite gedreht und der zweite Scan erfolgt. Die Zusammenführung der beiden Aufnahmen erfolgt anschließend im Programm Geomagic Control®.

Zuerst werden die beiden Punktwolken von dem Objekt nicht zugehörigen und redundanten Punkten gesäubert und in ein Polygonnetz um-

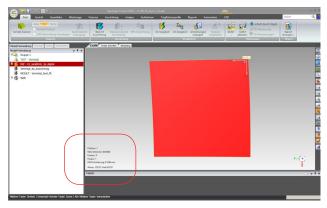


Abb. 4.1-11: IGES-Datei des digitalen Originals vereinfacht auf 400000 Polygone



Abb. 4.1-12: Erfassung des eingestellten Pixelfeldes



Abb. 4.1-13: Vorbereitung einer Sandform zur visuellen Erfassung



Abb. 4.1-14: Visuelle Erfassung eines bereits verbauten Schalenelmentes

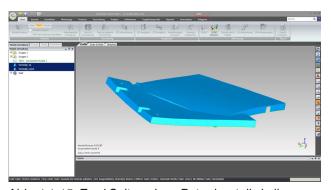


Abb. 4.1-15: Zwei Seiten eines Betonbauteils in ihrer gemessenen Ausrichtung vor der Ortientierung

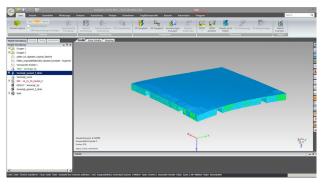


Abb. 4.1-16: Zwei Seiten eines Betonbauteils zueinander ausgerichtet und zu einem Modell zusammengeführt

gewandelt, und die Anzahl der Polygone wieder auf 2,5 Mio. pro Aufnahme reduziert. Anschließend werden die beiden Polygonnetze mittels Überlagerung der doppelt gescannten charakteristischen Elemente (Eckpunkte, Lunker, teils auch zusätzlich aufgebrachter Referenzpunkte) relativ zueinander ausgerichtet. Als Mittel wird hier wieder die Ausrichtung über eine definierte Anzahl von Punkten (nachfolgend N-Punktausrichtung genannt) genutzt.

Diese Scans werden für die Messung der Plattenstärke, Formgenauigkeit der Platte und der Kontaktflächen verwendet.

# Messeabweichungen und ihre Einflussfaktoren

Als Messabweichungen werden in diesem Zusammenhang Abweichungen bezeichnet, welche aufgrund der Datenerfassung und somit innerhalb des Mess- und Auswertungsprozesses entstehen. Hierbei handelt es sich also nicht um Fehler der Produktion, sondern um ungewollte aber teils unvermeidbare Abweichungen des Mess- und Auswertungsprozesses. Diese teilen sich in Abweichungen in der digitalen und realen Umgebung auf.

## Digitale Abweichungen

Zusammensetzen der digital erfassten Abschnitte

Lässt sich ein Objekt aufgrund der Bauteilgröße oder Lage nicht ohne Neuspositionierung des Messarms oder eben des Bauteils komplett erfassen (dies ist beispielsweise bei den Betonplatten der Fall), kann mittels Neupositionierung des Scanners (Bocksprung, wird im Abschnitt reale Abweichungen erläutert) oder eben des Bauteils, durch Verschieben oder Drehen erfolgen (Abb. 4.1-15). Anschließend müssen dann die einzeln gescannten Abschnitte ausgerichtet und zusammengesetzt werden (Abb. 4.1-16). Die Verfahrensweisen und deren Auswirkungen werden nachfolgend erläutert:

Die Platten werden, nachdem die erste Seite erfasst wurde, umgedreht. Diese Maßnahme der Neupositionierung macht ein Zusammensetzen der digitalen Abschnitte erforderlich. Dies erfolgt über eine Überlagerung der erfassten Kanten. Die Ausrichtung erfolgt dann im Rechner über eine N-Punktausrichtung, also eine manuelle Ausrichtung aufgrund der Einschätzung und der genauest möglichen Überlagerung. Da in

der intendierten Genauigkeit auch charakteristische Punkte der Objekte unterschiedlichen dargestellt werden, ist hier eine gewisse Unschärfe unvermeidlich. Im Rahmen der Untersuchungen zu den Fertigungsgenauigkeiten der Kontaktflächen, wurde in einer Testserie die Wiederhohlgenauigkeit der Ausrichtung über die drei Referenzpunkte und über die Eckpunkte durchgeführt. Dabei zeigte sich eine zu erwartende Maximalabweichung von ±0.17mm (Referenzpunkte) und eine Maximalabweichung ± 0.31mm (siehe Appendix). Diese ist auch hier zu erwarten.

#### Ausrichten über die 3 Referenzpunkte

Die Ausrichtung des digital erfassten realen Objektes erfolgt über eine Überlagerung der drei Referenzpunkte (Abb. 4.1-18). Diese sind als digitales Modell erstellt und bilden die Ausrichtungsreferenz. Das reale Pendant ist der Mittelpunkt der Kegelstumpfflächen. Dieser wird durch maximales Zoomen durch den Auswertenden manuell erfasst. Da sich die kreisrunden Kegelstumpfflächen bei maximalem Zoomen (auch bei einer Auflösung der gescannten Fläche von 2.5 Millionen Polygonen) als gezackte Polygonfläche darstellt, ist hier eine Abweichung zu erwarten.

#### Ausrichten über die 8 Eckpunkte

Die Ausrichtung des digital erfassten realen Objektes erfolgt über eine Überlagerung der 8 Eckpunkte (Abb. 4.1-19). Diese Positionierung ist eine Mischung aus der drei Referenzpunkt-Methode und der Best-Fit Methode. Der Vorteil in dieser Methode liegt in der Best-Fit-artigen Überlagerung (ein Kippen oder Rotieren ist nur noch schwer möglich,) bei zeitgleicher Kenntnis über den Ausrichtungsvorgang. Da die Bauteile für die weiteren Bearbeitungsschritte des Flankenschleifens über die 3 Referenzpunkte ausgerichtet werden, ist die hier präsentierte Methode nur als Ergänzung geeignet.

#### Ausrichten mittels "Best-fit"

Bei der Ausrichtung mittels der "Best-fit" Methode ermittelt ein programmeigenes Script die Ausrichtung des Testobjektes anhand einer zufällig ausgewählten Anordnung von Punkten (die Anzahl der Punkte ist mittels "Sample Size" einstellbar). Diese werden mit dem digitalen Objekt abgeglichen und anhand dieses Abgleichs das Objekt ausgerichtet, über "Tolerance" wird die maximal erlaubte Abweichung zwischen den beiden Punkten eingestellt (Abb. 4.1-20).

Das Programm zeigt (am Abschluss dieser Aus-

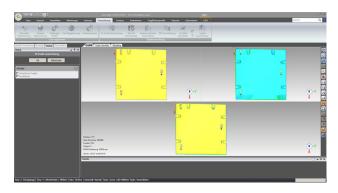


Abb. 4.1-17: Ausrichtung des zusammengeführten vereinigten Scans zur digitalen Geometrie anhand der...

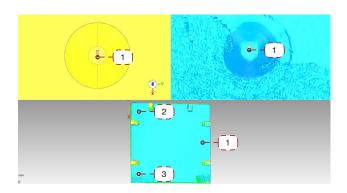


Abb. 4.1-18: ...drei Referenzpunkte

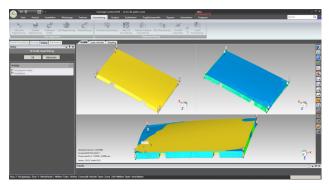


Abb. 4.1-19: Ausrichtung des vereinigten Scans mittels einer Orientierung über die acht Eckpunkte

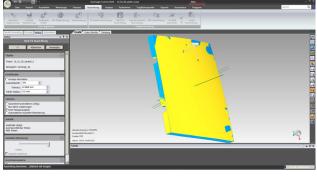


Abb. 4.1-20: Ausrichtung des vereinigten Scans mittels Best-Fit Orientierung



Abb. 4.1-21: Platzierung der Messkegel innerhalb des Arbeitsbereiches des Messarms



Abb. 4.1-22: Erfassung der Messkegel mittels taktiler Messung

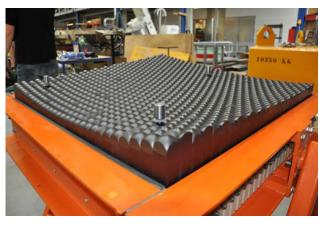


Abb. 4.1-23: Eingestellter Pixeltisch mit Referenzkegeln

richtung) die maximal auftretenden Abweichung und den Abweichungsdurschnitt an. Um die Genauigkeit dieser Maßnahme zu steigern, kann dieser Prozess mit verfeinerten Einstellungen wiederholt werden.

Da dieser Prozess vollautomatisiert iteriert, ist der Einfluss des Bearbeiters hier sehr gering. Übergeordnete Regeln sind kaum herzustellen, jedes Testobjekt wird nach den individuell vorherrschenden Kriterien ohne Korrekturmöglichkeiten zur originalen Referenz ausgerichtet. Die Entscheidungsgrundlage der Maßnahme ist schwer erkenn- und nachvollziehbar, was Schlussfolgerungen über die auftretenden Abweichungen erschwert.

Diese Eigenschaften machen diese Methode vor allem für schnelle Einzelmessungen individueller Bauteile interessant. Sollen Beziehungen innerhalb einer Fertigungsserie hergestellt und sichtbar gemacht werden, ist eine kontrolliertere Ausrichtungsmethode zu bevorzugen.

#### Reale Abweichungen

Ausrichtung über Bocksprung

Lässt sich ein Objekt aufgrund der Bauteilgröße oder Lage (auf dem Boden liegend) nicht mit einen Aufbau des Messarms komplett erfassen (dies ist beispielsweise bei den Betonplatten der Fall), kann die Messung auf zwei Arten erfolgen: Mittels Neupositionierung oder Bocksprung.

Beim Bocksprung wird der Messarm während des Messvorgangs neu positioniert. Diese Positionierung erfolgt in vier Schritten:

Es werden vier magnetisch fixierbare Messkegel in Reichweite des Messarms positioniert. Idealerweise sollte sich mindestens einer dieser Messkegel in deutlich anderer Position in Bezug auf die Z-Achse befinden (also erhöhte oder gesenkte Position).

Diese Position wird in Reihenfolge taktil vom Messarm erfasst und eingespeichert (Abb. 4.1-22).

Der Messarm wird neu positioniert (alle 4 Messpunkte müssen von der neuen Position erreichbar sein).

Von der neuen Position werden die 4 Messpunkte erneut in der gleichen Reihenfolge taktil erfasst. Das Programm errechnet die aktuelle Position aufgrund der erfassten Messpunkte und gibt eine ermittelte mögliche Abweichung zwischen digitaler errechneter und realer Position an.

Diese befindet sich bei genauer Arbeitsweise im Bereich <0.01 mm. Sie ist somit vorhanden,

aber im Bereich der gewünschten Genauigkeit nur von untergeordneter Relevanz.

Position der drei realen Referenzpunkte auf dem Pixeltisch

Die Position der drei realen Referenzpunkte ist über drei Pixel Referenzpixel in X- und Y-Achse fixiert. Diese Position erfährt jedoch geringe Veränderungen wenn die Pixel in Z-Richtung verschoben werden, da die sich Klemmung beim Fixieren des gesamten Pixelpaketes, bei verschiedenen Einstellungen unterschiedlich verhält. Beispielsweise sei hier das auffächernde Verhalten des gesamten Pixelfeldes angeführt, welches sich bei der Klemmung des komplett ausgefahren Feldes einstellt (Abb. 4.1-24).

Das erneute Einbringen der Referenzkegel in die Sandform zum Ermitteln der Position

Die Referenzkegel werden zum Ausrichten der Sandform an das digitale Original beim Scannen der Sandform wieder in dieser platziert. Verunreinigungen durch Sand können das komplette Einlassen der Kegel verhindern. Aufgrund dessen entsteht eine Verschiebung der Z-Position, die Ausrichtung des realen Modells zum digitalen Original stimmt nicht und ein "Kippen" des realen Modells ist die Folge.

Differenz zwischen digitalem Einlegeteil und realer Position

Das reale Positionieren der Einlegeteile erfolgt über Einmessen von Hand und mittels Befestigung über Verschraubung. Zum einen erfolgen diese Eingriffe von Hand und wird mit menschlicher Ungenauigkeit ausgeführt. Zum anderen wird die plane Unterseite des Einlegeteils auf der doppelt gekrümmten Sandform aufgebracht. Durch das Verschrauben werden sie in einer Position fixiert die nur annähernd der entspricht.

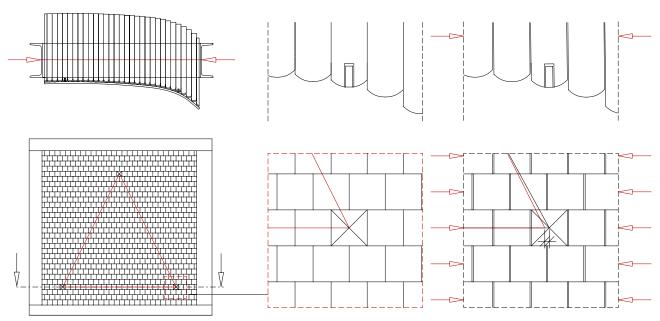


Abb. 4.1-24: Potentielle Auswirkungen des Klemmens einer Pixelreihe auf die Position des Referenzpixels

Abb. 4.1-25: Abstand zwischen einer NURBS-Spline und einer Polylinie

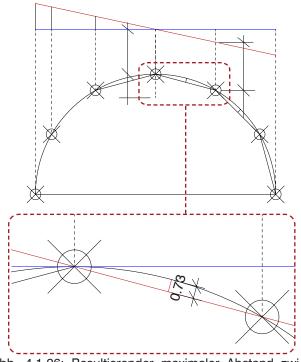


Abb. 4.1-26: Resultierender maximaler Abstand zwischen Soll- und Ist-Position der Pixel aufgrund der Punktberechnung mit 13 Punkten pro Pixel

# Einflussfaktoren für Abweichungen in der Fertigung

Ziel der Messungen und der Auswertung der Ergebnisse ist zum einen der Nachweis und die Dokumentation der erreichten und erreichbaren Genauigkeit des Produktionsverfahrens und zum anderen die Ermittlung der Ursachen und Fehlerquellen von auftretenden Abweichungen. Als Abweichungen werden Maß- und Formdifferenzen bezeichnet, die infolge des Produktionsverfahrens entstehen können.

Diese Abweichungen teilen sich noch einmal in die Unterkategorien der beiden Fertigungsprozesse "Formgenerierung" und "Formatschleifen".

In der nachfolgenden Beschreibung werden diese aufgelistet und erläutert. Die tatsächliche Auswirkung ist Gegenstand der folgenden Untersuchungen.

#### **Formgenerierung**

Reduktion der Fläche auf eine Punktwolke mit 915 Punkten

Das grundsätzliche Konzept des Pixelfeldes setzt eine Abstraktion der NURBS-Flächen und eine Vereinfachung in eine Punktwolke von 915 Punkten voraus. Dies entspricht dem Aufbau einer Polylinie an 30/31 Kontrollpunkten. Der Zwischenraum der Linien ist nicht kontrolliert. Vergleicht man die Polylinie mit der echten Kurve, ergeben sich beim minimalen konstant einstellbaren Radius von 0,757 m eine Abweichung von bis zu 0,21 mm (Abb. 4.1-25).

In der Realität sind die Faktoren für die Abweichungen allerdings deutlich komplexer und ergeben sich in Abhängigkeit von Kontaktfläche und Zwischenraum, Sanddruck und Eigensteifigkeit der Schalhaut. Eine Quantifizierung ist erst durch empirische Messungen möglich.

Berechnung der Pixeleinstellung über eine finite Menge an Punkten

Die Ermittlung des notwendigen Verfahrwegs erfolgt über eine Abstandmessung in Richtung der Z-Achse zwischen dem halbkugelförmigen Pixel und der einzustellenden Fläche. Da die exakte Ermittlung des Minimalabstands von zwei gekrümmten Flächen aufwändig und kompliziert ist, wird dieses Problem näherungsweise gelöst.

Auf dem digitalen Modell des Pixels werden 13 Messpunkte erstellt. Diese werden auf die Freiformfläche projiziert und der Abstand aller Punkte berechnet. Der kürzeste Wert wird zur Berechnung des Werkzeugpfads herangezogen. Daraus ergibt sich eine mögliche maximale Abweichung von 0.73mm. (Abb. 4.1-26). Dieser Wert kann durch eine Erhöhung der Anzahl der Messpunkte oder durch eine effektivere Anordnung noch reduziert werden.

Ausrichtung des Pixeltisches relativ zum Roboter Der Pixeltisch wurde nur einmal (vor der ersten Einstellung) eingemessen (Abb. 4.1-27). Da er aber für den weiteren Fertigungsprozess immer wieder ab und neu aufgebaut wurde, ist hier auch von leichten Abweichungen auszugehen. Anmerkung: Hierbei handelt es sich grundsätzlich nur um "Relativ-Verschiebungen" deren Auswirkung sich nur im Grenzbereich der Einstellung gegen 0 oder gegen 150 mm Hub zeigen würden, wenn dadurch einer der Pixel auf Anschlag oder gar nicht verschoben werden würde. Da von den neun Einstellung des Pixelfeldes nur die Bauteile 1 und 8 die maximale Verschiebung von 150 mm überhaupt erreichen oder überschreiten, ist dieses Problem nur bei diesen Einstellungen relevant.

#### Die Fertigungstoleranzen der Pixel

Die Pixel wurden mit einer Toleranz von 30  $\pm 0,20$ mm gefertigt. Die gelieferten Pixel befinden sich alle auf der positiven Seite der Toleranz und wurden mit einer Größe von 30,08 mm bis 30,15 mm geliefert. Daher ist das reale Pixelfeld in seinem Gesamtmaß ca. 4,5 mm größer; also 904,5 mm x 904,5 mm. Die Die Längentoleranz wurde mit 400- $\pm 0.80$ mm angegeben. Dieser Wert wurde bei einer stichprobenartigen Messung von 25 Pixeln mit <- $\pm 0.20$ mm allerdings deutlich unterschritten (Abb. 4.1-28).

Die Stärke der Matten (Fertigungstoleranzen) Es wurden insgesamt drei Elastomermatten mit einer Shorehärte von 40 verwendet. Sie fungiert zum einen als Zwischenfläche und "verschmiert" die eigentliche pixelartige Oberfläche zu einer homogenen Schalungsoberfläche. Sekundäre Aufgabe ist die Funktion als Sauberkeitsschicht. Sie schützt den Pixeltisch vor den Mechanismus hemmenden Sandpartikeln und unterstützt somit die Funktionsfähigkeit des Systems. Dabei handelt es sich zum einen um eine 10 mm starke Matte, die auf das eingestellte Pixelfeld aufgelegt wird um die erste Sandform abzunehmen. Zwei 25 mm starke Matten dienen gemeinsam der Abnahme der Konterschalung. Sie werden auf die erstellte Sandform aufgelegt und anschließend der Formsand aufgebracht.

Die verwendeten Elastomermatten sind als Me-



Abb. 4.1-27: Positionierung des Pixeltisches

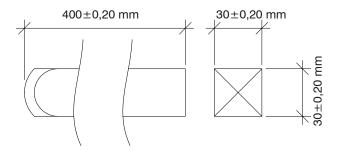


Abb. 4.1-28: Fertigungstoleranzen der Pixel

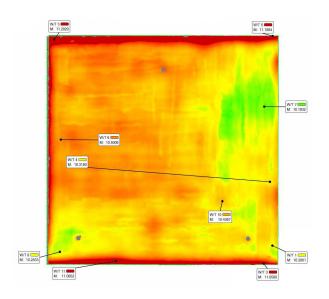


Abb. 4.1-29: Fertigungstoleranzen der Matten (beispielsweise abgebildet SH 40 10 mm)

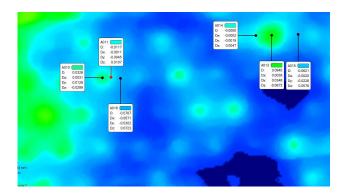


Abb. 4.1-30: Im Scan sichtbar: Die Textur der Sandform aufgrund der lokalen Verformungen der Elastomermatte

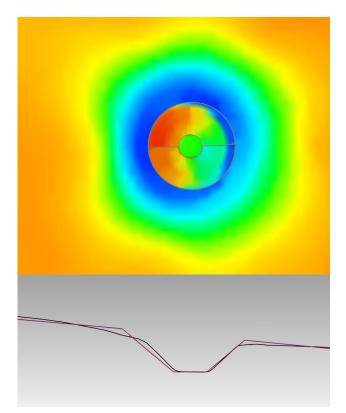


Abb. 4.1-31: Lokalen Verformungen aufgrund der Einspannung der Elastomermatte in Ansicht und Schnitt

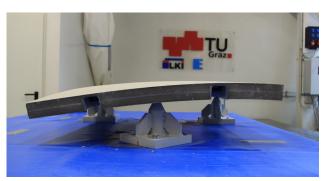


Abb. 4.1-32: Ausrichtung der Platte auf der 3-Punkt-Aufspannvorrichtung

terware für einen Einsatz in der Fördertechnik hergestellt und nicht in den sonst in diesem Projekt geforderten Toleranzen gefertigt (Abb. 4.1-29). Diese Fertigungstoleranzen haben direkten Einfluss auf die Formgenauigkeit der Flächen (siehe Kapitel 4.3).

#### Elastizität contra Steifigkeit der Matten

Die verwendeten Elastomermatten erfüllen zwei sehr gegensätzliche Aufgaben, da sie zum einen die globale Krümmung der eingestellten Geometrie exakt abbilden sollen und hierfür möglichst elastisch sein sollen, zum anderen lokale Vertiefungen im Bereich der zwischen den Pixeln liegenden Hohlräume zu vermieden sind, was wiederum eine gewisse Steifigkeit voraussetzt (Abb. 4.1-30).

Lokale Verformung der Elastomermatte aufgrund des Aufbringens des Formsandes

Das Einbringen des Formsandes führt, aufgrund des Eigengewichts und dem Prozess der mechanischen Verdichtung, zu lokalen Deformationen der Schalhaut, die sich an den hohlen Bereichen zwischen den Pixeln leicht angleicht. Diese Verformung ist in praktischen Versuchen aber kaum wahrnehmbar aufgetreten und zeigt sich nur bei bestimmtem Lichteinfall und in den gescannten Bildern.

Rückstellung der Elastomermatte aufgrund der Eigensteifigkeit des Materials

Nach der elastischen Verformung der Elastomermatten (durch das Verdichten des Sandes) hat diese naturgemäß das Bestreben in ihre Ausgangsgeometrie zurückzustellen. Diesem unerwünschten Verhalten entgegen, wirkt ausschließlich die Gewichtskraft des verdichteten Sandes, die daher höher sein muss als die Rückstellkraft der verformten Matte.

Anmerkung: Bei den hergestellten Versuchen konnte kein Rückstellen der Ealstomermatten beobachtet werden.

Fixierung der Matte mittels der drei Referenzpixel Die 10mm starke Elastomermatte ist an den drei Referenzpixeln ausgespart um die Platzierung der Orientierungsbolzen zu ermöglichen. Diese Orientierungsbolzen spannen die Matte ein und führen somit zu lokalen Verformungen der Elastomermatte und in direkter Folge zu einer Verformung dieses Bereiches im Bauteil (Abb. 4.1-31).

#### **Formatschleifen**

#### Ausrichtung der Platte

Die Platte wird zum Fräsen der Kontaktflächen auf einer auf 3-Punkt Aufspannvorrichtung ausgerichtet (Abb. 4.1-32), die geometrisch ident mit den Referenzpixeln ist. Die Werkzeugpfade werden anhand des digitalen Modells erzeugt. Abweichungen des betonierten Bauteils bleiben genauso wie deren Auswirkung auf die Position, unberücksichtigt. Zwar wird weder die Maßhaltigkeit noch die Formgenauigkeit der Kontaktflächen selbst beeinflusst, da alle Flanken dennoch bearbeitet werden, aber die Position relativ zum Bauteil verändert sich und somit die Ausrichtung der Platte beim Zusammenbau der gesamten Schale.

#### Abnutzung des Schleifwerkzeugs

Die Materialkombination von UHPC und Stahlfasern ist für die gemeinsam zerspanende Bearbeitung ungünstig, da für eine solche Bearbeitung idealerweise unterschiedlich Schneidgeometrien verwendet werden (Abb. 4.1-33). Infolge ist die Werkzeugverschleiß sehr hoch und differiert je nach Ausrichtung der Stahlfasern so stark, dass er als Einflussfaktor im Prozess in Betracht gezogen werden muss. Das Resultat schlägt sich in Form eines zunehmenden Übermaßes der Platten nieder.

#### Variierendes Übermaß der Stirnseiten

Eine U-förmige Randabschalung wird auf den Sandformen platziert und mittels Verschraubung fixiert. Somit sind drei Seiten des Bauteils schon grob formatiert (nicht auf der Oberseite, hier wird der Beton eingefüllt). Das Übermaß der Schalenelemente variiert an den verschiedenen Seiten noch deutlich, von wenigen Millimetern zu einigen Zentimetern und somit auch die Materialmenge, die mittels Fräsen abgetragen wird (Abb. 4.1-34).

Variiert diese stark, können geometrische Spitzen entstehen, die trotz des abschließenden Finishs mit einer zehnmaligen Zustellung von 1/100 mm, nicht restlos entfernt werden.

Abstand des Schleifwerkzeugs zum Roboterursprung (Hebelarm contra Steifigkeit)

Aufgrund der Bauteilgröße der Schalenbauteile wird beinahe die komplette Reichweite des Industrieroboters benötigt (Abb. 4.1-35). Mit steigendem Abstand des Schleifwerkzeugs zum Roboterursprung, steigt auch die potentielle Ungenauigkeit des Schleifbildes.



Abb. 4.1-33: sichtbare Abnutztungserscheinung am Schleifwerkzeug

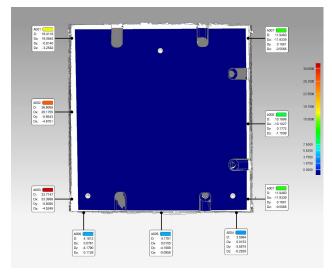
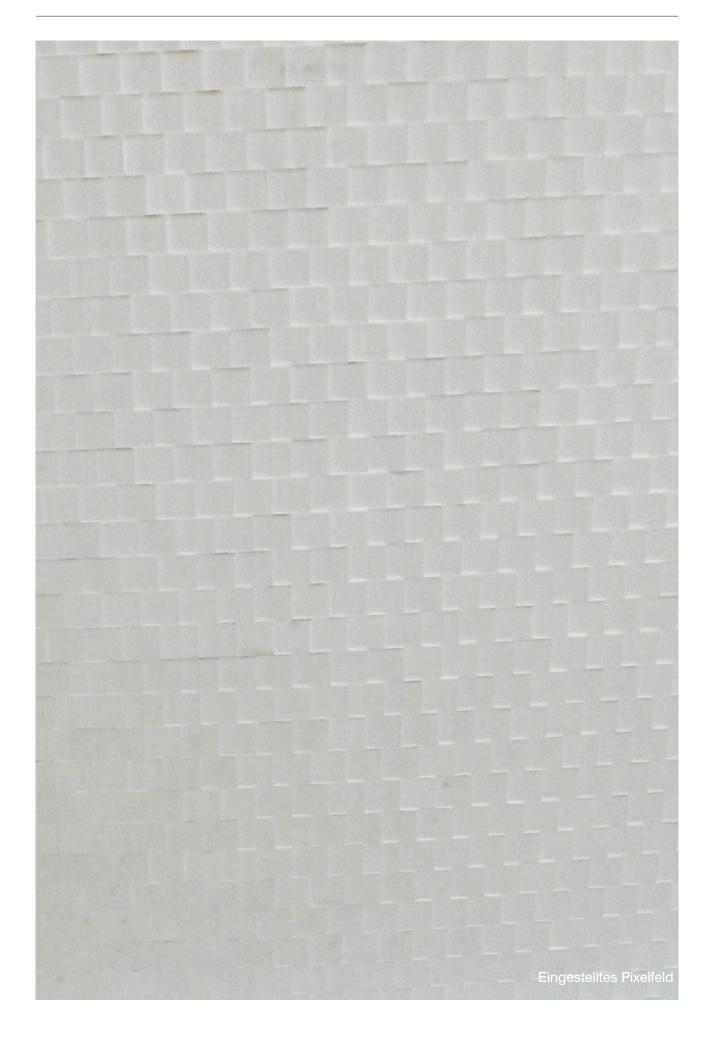


Abb. 4.1-34: Zu entferndes überstehendes Material an den Stirnseiten zwischen 3,5 und 34 mm





Abb. 4.1-35: Steigende Abstände/Hebel des Werzeugs während der Schleifbearbeitung



# 4. Ergebnisse und Auswertungen

### 4.2 Einstellungsgenauigkeit des Pixelfeldes

#### Einleitung zu den Messeprozeduren und -ergebnissen der Einstellungen des Pixelfeldes

Die entwickelte adaptive Schalung *Pixelfeld*, mit einer Feldabmessung von 900mm x 900 mm geplant und konstruiert, ist in seiner Größe grundsätzlich skalier- und adaptierbar. Sie ist in ihren Abmessungen auf den Arbeitsbereich des im RDL-Labor installierten ABB- IRB 6600 Industrieroboters angepasst. Aber auch die weitere Handhabung, z.B. Erreichbarkeit oder Transportierbarkeit, waren Einflussfaktoren für das gewählte Maß.

#### Ausrichtung und Messverfahren:

Wie bereits im Kapitel 4.1 beschrieben, wurden die Einstellungen der Pixel taktil erfasst. Für den Vergleich von digital und real, wird die daraus resultierende Punktwolke in das für diesen Zweck geschriebenen Grasshopper Script eingelesen.

Dort erfolgt die Orientierung durch eine Ausrichtung der erfassten drei Referenzpixel an dem digitalen Modell. Von den restlichen 912 Pixeln wird automatisiert die Distanz zwischen den digitalen und realen Punkten in z-Achse ermittelt und in mm angegeben. Die Skala zur Beurteilung der Abweichungen ist wie folgt unterteilt:

maximal Kritisch positiv:	>+1.50mm
	+1.25 - +1.50mm
	+1.00 - +1.25mm
	+0.75 - +1.00mm
	+0.50 - +0.75mm
	+0.25 - +0.50mm
nominell:	+0.250.25mm
	-0.250.50mm
	-0.500.75mm
	-0.751.00mm
	-1.001.25mm
	-1.251.50m
maximal Kritisch negativ:	>-1.50mm

Zur Bewertung der Einstellgenauigkeit sind folgende Beobachtungen erfolgt:

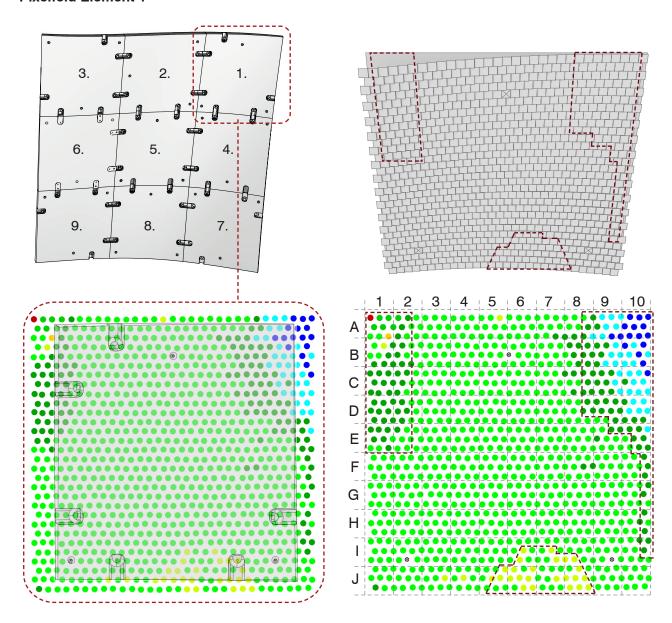
- Reihenfolge der Einstellung
- Vergleich digitales Modell und real eingestelltes Pixelfeld
- Zusammenhang zwischen Abweichung und Position der Pixel in X-, Y- und Z-Ausrichtung
- Veränderungen der Einstellungen im Rahmen der Abnahme der Sandform

#### Einstellungsreihenfolge

Die Pixelfelder wurden in der Reihenfolge Schalenelement 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 1, 2 eingestellt. Während der ersten Phase der Einstellungen, der ersten Formen 3,4 und 5, wurden die Pixel, die sichtbar für Abweichungen durch Verschieben des Nachbars sorgten, durch Nachbearbeitung oder Neusortierung behandelt.

Im Rahmen der Messungen wurden die Einstellungen 3, 5, 7, 8, 9, 1, und 2 erfasst. Die Einstellungen 4 und 6 konnten aus logistischen Gründe nicht mit aufgenommen werden. Die Einstellung des Pixelfeldes 3 wurde vor und nach dem Aufbringen des Formsandes erfasst. Die Einstellungen 1, 2, 7, 8, 9 wurden auf einen effizienten Formsandeinsatz optimiert.

#### **Pixelfeld Element 1**



Eingestellt in Reihenfolge: 8

**Einstellungsgenauigkeit:** 78,4% < +-0.25mm

#### Nesterbildung ungenauer Einstellungen:

A1 - E2 ca. 70 Pixel 0.25mm -1.0mm zu hoch A8 - I10 ca. 100 Pixel 0.25mm -0.50mm zu hoch I5 - J8 ca. 25 Pixel 0.25-0.50mm zu gering

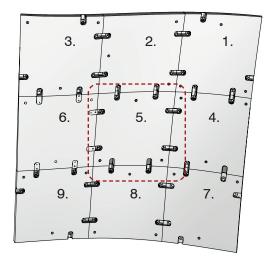
Maximale Einstellungstiefe: 148.0 mm

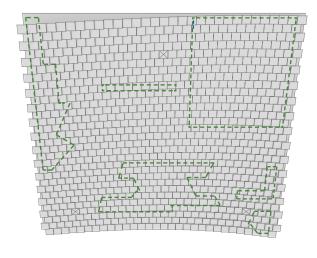
**Anmerkung:** Ein Pixel im Bereich A1 auf maximaler Einstellung. Die Einstellungsabweichungen nehmen im Bereich A1 - E2 verstärkt zu.

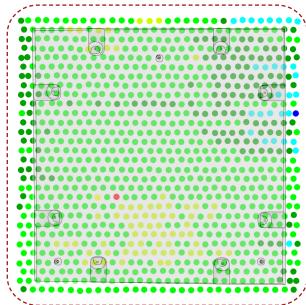
#### gemessene Einstellung

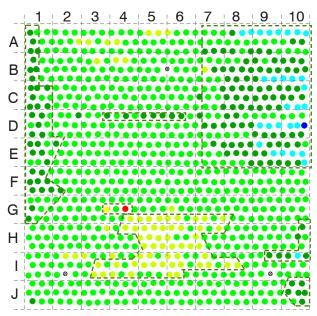
Abweichung	Anzahl
>+1.50mm	1
+1.25 - +1.50mm	X
+1.00 - +1.25mm	X
+0.75 - +1.00mm	X
+0.50 - +0.75mm	X
+0.25 - +0.50mm	28
+0.250.25mm	717
-0.250.50mm	123
-0.500.75mm	33
-0.751.00mm	12
-1.001.25mm	1
-1.251.50m	X
>-1.50mm	X

#### **Pixelfeld Element 5**









#### Eingestellt in Reihenfolge: 3

**Einstellungsgenauigkeit:** 72,4% < +-0.25mm

#### **Nesterbildung ungenauer Einstellungen:**

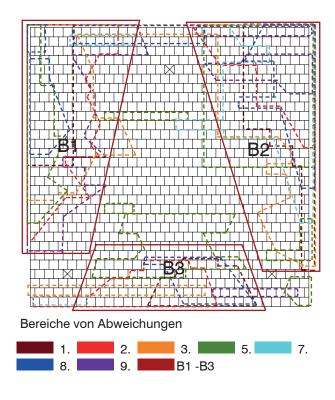
A1 - G1 ca. 35 Pixel 0.25mm -0.50mm zu hoch A7 - E10 ca. 100 Pixel 0.25mm -0.75mm zu hoch G4 - I8 ca. 70 Pixel 0.25-0.50mm zu gering

#### Maximale Einstellungstiefe: 107.4 mm

**Anmerkung:** Im Bereich G4, Reihe 19 ein Pixel >1,50mm durch Nachbarpixel mit verschoben. Dieser Fehler ist im gesamten weiteren Fabrikatiionsprozess erkennbar.

#### gemessene Einstellung

Abweichung	Anzahl
>+1.50mm	1
+1.25 - +1.50mm	X
+1.00 - +1.25mm	X
+0.75 - +1.00mm	X
+0.50 - +0.75mm	X
+0.25 - +0.50mm	70
+0.250.25mm	663
-0.250.50mm	150
-0.500.75mm	29
-0.751.00mm	1
-1.001.25mm	X
-1.251.50m	X
>-1.50mm	X



#### Beurteilung der Einstellgenauigkeit

Die Ausrichtung der eingestellten Pixel anhand der Referenzpixel führt zu keiner erkennbaren Unschärfe in Form von horizontalem oder vertikalem Kippen des gesamten Systems und kann daher als Orientierungsmethode beibehalten werden.

Im Durchschnitt werden etwas über 75% mit Genauigkeit < +-0.25mm eingestellt. Die höchste Abweichung wurde bei dem ersten eingestellten Feld Nr. 3 gemessen (65,2%) die niedrigste bei Einstellung Nr. 7 (85,5%). Die Einstellungsreihenfolge hat einen Einfluss auf die Genauigkeit der Einstellung. Bei den ersten drei Einstellungen der Elemente 3, 4 und 5 kam es noch partiell zu groben Mitverschiebungen in einzelnen Bereichen, weshalb hier noch einige Ansteuerungen mehrfach gefahren wurden und die Pixel teils auch noch nachgearbeitet oder deren Position getauscht wurde. Die Einstellungen der Elemente 7, 8, 9, 1 und 2 sind deutlich genauer: 69,1%, stehen 78,8% hier gegenüber.

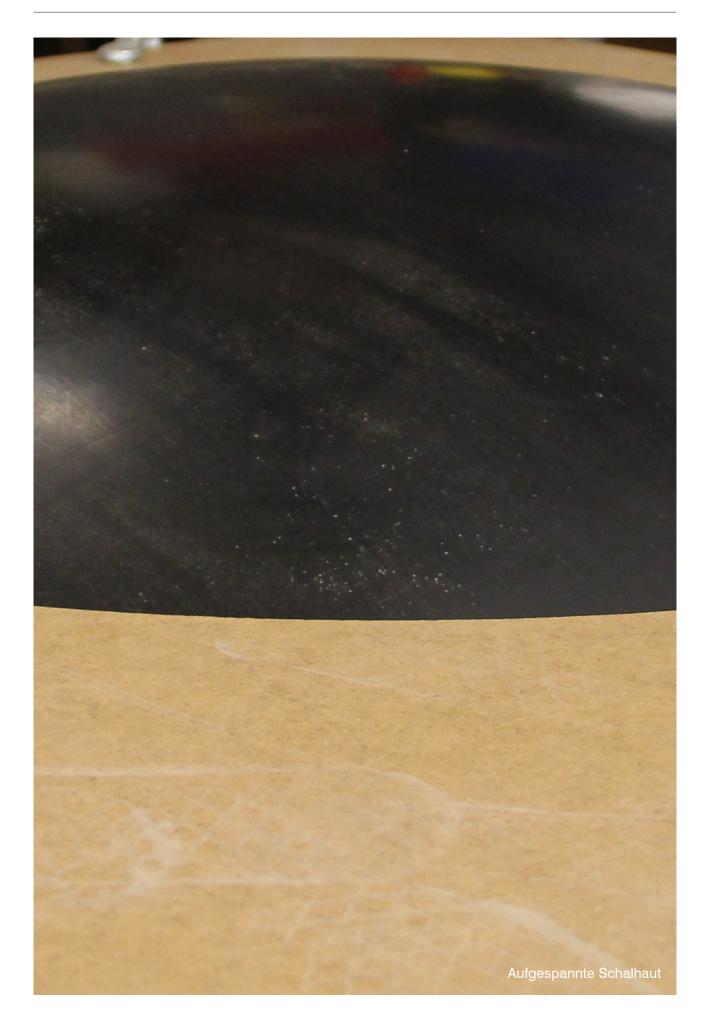
Grundsätzlich lassen sich drei Bereiche eingrenzen, in denen die Abweichungen vorherrschen. Dies sind zum einen die beiden Bereiche in den oberen Ecken B1 und B2, bei denen die Abweichungen zu hoher Einstellungen vorherrschen und zum anderen die untersten vier Reihen im mittigen Bereich B4, bei denen zu geringe Einstelltiefen vorherrschen. Im Dreieck zwischen den Referenzpixeln ist die Einstellgenauigkeit im Vergleich sehr hoch.

Es kann kein direkter Zusammenhang zwischen Einstellungstiefe der Pixel und auftretenden Abweichungen beobachtet werden. Daher ist hier von einer konstruktionsbedingten Eigenschaft auszugehen, die beispielsweise durch das Mitverschieben bei der Einstellung und/oder das Klemmen hervorgerufen wird. Eine Ansammlung von zu kurzen Pixeln wird ebenso ausgeschlossen.

Erkennbar ist eine Verbesserung der Genauigkeit in der Einstellungsreihenfolge. Die Einstellung Nr. 3, die als erstes eingestellt wurde, ist auch die ungenauste. Ein so deutliches Mitverschieben eines Nachbarn wie bei der Einstellung des Bauteils 5 hat sich später nicht mehr wiederholt.

#### Summierung aller Einstellungen

Abweichung	Anzahl	Durchschnitt	Aufteilung in %
>+1.50mm	5	<1	<0.1
+1.25 - +1.50mm	X	X	X
+1.00 - +1.25mm	2	<1	<0.1
+0.75 - +1.00mm	X	Χ	X
+0.50 - +0.75mm	8	1	<0.1
+0.25 - +0.50mm	225	35	3.8
+0.250.25mm	4867	695	75.9
-0.250.50mm	932	133	14.5
-0.500.75mm	276	39	4.2
-0.751.00mm	53	5	0.5
-1.001.25mm	9	2	0.3
-1.251.50m	5	<1	<0.1
>-1.50mm	5	<1	<0.1



## 4. Ergebnisse und Auswertungen

### 4.3 Die Schalhäute

#### Vorversuche "Kugelkalotte"

Beide entwickelte Schaltischkonzepte sehen die Verwendung einer Schalhaut zur Überdeckung der Stempelköpfe vor. Sie bildet die tatsächliche Schaloberfläche und ist daher auf ihre Eigenschaften zu untersuchen. Daher wurde in Vorbereitung, unabhängig von den Schalungskonzepten, eine Untersuch zur grundsätzlichen Eignung verschiedener Materialien durchgeführt. Zwei Elastomertypen der Shorehärte SH 40 und SH 60 in den Materialstärken 10 mm und 25 mm wurden dazu praktisch getestet.

Jede der vier Elastomerplatten mit den Maßen 1200 mm x 1200 mm wird zwischen zwei 38 mm dicke MDF-Grundplatten mit kreisrundem Ausschnitt (Durchmesser von 950mm) eingespannt. Dieses "Sandwich" wird mittels Zwingen auf einer Kugelkalotte mit einem Kugelradius von 1000 mm aufgespannt, und dadurch die ebene Platte in die gewünschte Form gezwungen (Abb. 4.3-1 bis -3). Die gewählte Geometrie der Kugelkalotte bildet die angestrebte maximale doppelte Krümmung der Bauteile ab und fordert in direkter Folge die maximale Elastizität des im Ausgangszustand ebenen Materials. Dabei steigt der abzubildenden Flächeninhalt von 14400 cm² auf 14853 cm², also um ca 3%.

Zur anschließenden Beurteilung der grundsätzlichen Eignung, Formgenauigkeit und Rückstellverhalten werden Spannungs- und Entspannungsverhalten beobachtet und mittels eines visuellen Scans, die Formgenauigkeit der jeweiligen Schalhaut ermittelt.



Abb. 4.3-1: Gefräste und gefüllerte Kugelkalotte

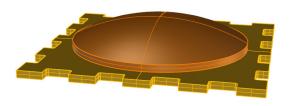


Abb. 4.3-2: Eingespannte Schalhaut während der Messung



1. in einem Sandwich eingespannte Schalhaut

2. gefräste Kugelkalotte



3. zusammengespannte und somit aufgezogene Schalhaut

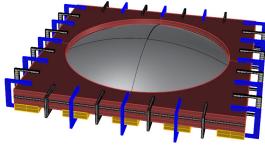


Abb. 4.3-3: eingespannte Schalhaut

Ergebnis Elastomer SH 40 (rot) 10 mm und 25 mm, qualitative Einschätzung (Abb. 4.3-4)

Beide Schalhäute lassen sich ohne erkennbare Probleme auf die Vorrichtung aufziehen. Um die gewünschte Form zu erreichen ist ein Niederspannen des Sandwisches mittels des Einsatzes von Zwingen zwar notwendig, aber aufgrund der relativ hohen Elastizität der Matten, nur eine geringe zusätzliche Krafteinwirkung erforderlich. Bei der 25 mm starken Matte ist der notwendige Kraftaufwand naturgemäß höher.

Die Kugelkalotte wird sehr gut abgeformt, die Schalhaut liegt satt auf. Auf den ersten Blick gibt es keine erkennbaren Stauchungen, Faltenbildung oder partiell andersartigen Verformungen der Schalhaut.

Das Rückstellverhalten der Elastomerplatte ist spontan und schnell. Nach dem Entspannen wird die Ursprungsform innerhalb weniger Sekunden (<10 sek.) erreicht.

#### Ergebnis der visuellen Datenerfassung

Die Schalhaut bildet die Kugelkalotte großflächig homogen nach. Im Zentrum zeigt sich eine Formabweichung in den negativen Bereich (-0.25mm), was auf eine Abnahme der Materialstärke der Schalhaut aufgrund der Dehnung schließen lässt. Zum Rand hin gleicht sich diese Abweichung wieder aus, um direkt im Randbereich stark im positiven Bereich zu werden (>+0.50 mm). Dieser rot dargestellte Bereich wird allerdings einem potentiellen Abheben der Matte und/oder einer Stauchung durch das "Umknicken" im Bereich der Einspannung zugeschrieben (Abb. 4.3-6 und -7).

Ergebnis Elastomer SH 60 (schwarz) 10 mm und 25 mm, qualitative Einschätzung (Abb. 4.3-5) Das Aufziehen der Schalhäute benötigt deutlich mehr Kraft. Ist die Vorrichtung aufgebracht, wird die Kugelkalotte sehr gut abgebildet und die Schalhaut liegt satt auf. Es gibt wieder keine

Faltenbildung der Schalhaut.

Das Rückstellverhalten ist deutlich träger. Nach dem Entspannen verbleibt die Platte noch einige Sekunde in der Ursprungsform und zieht sich deutlich langsamer (>30 sek.) in die Ursprungsform zurück. Wann die tatsächliche Rückführung in die Ausgangsform erfolgt, wäre erst durch weitere Messungen erkennbar. Dieses Verhalten ist der deutlichste Unterschied der beiden getesteten Shorehärten und ein gewichtiger Nachteil der Variante SH60.

Ergebnis der visuellen Datenerfassung Die Schalhaut bildet die Kugelkalotte großflächig homogen nach (Abweichungen im Bereich von +0.50 - -0.50 mm). Allerdings zeigt sich eine ungleichmäßigere Verteilung der Materialstärke in aufgebrachtem Zustand (c-förmig, E5-E6). Dies könnte auf eine ungleichmäßigere Elastizität aufgrund von Fertigungstoleranzen hinweisen, aber auch eine Folge des Aufziehens der Schalhaut auf die Kalotte sein. In gleichem Maß gleicht sich diese Abweichung zum Rand hin wieder aus, um direkt im Randbereich stark im positiven Bereich zu werden (>+0.50 mm). Die Schalhaut SH 60 25 mm verhält sich wieder gleichmäßig. Die Formabweichung ist im Zentrum ist mit der der SH 40 25 mm vergleichbar. Die lokalen Deformation, die bei der Schalhaut SH 40 25 mm beobachtet wurden, tauchen hier nicht mehr auf (Abb. 4.3-8 und -9).

#### Fazit

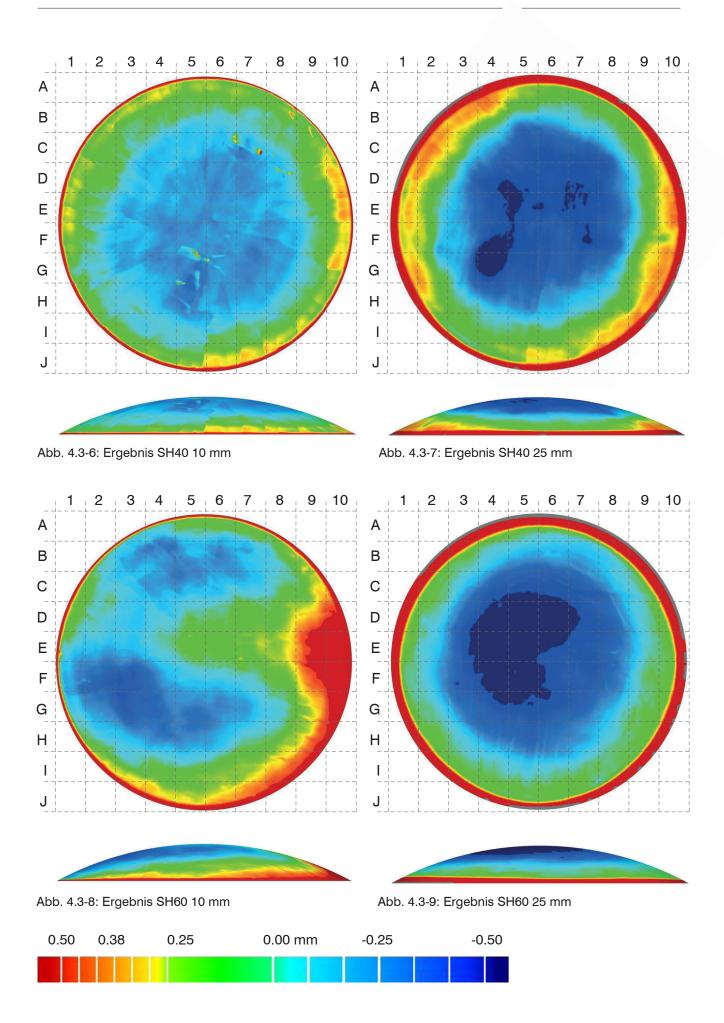
Die Schalhaut SH40 weist im Vergleich ein schnelleres Rückstellverhalten auf und es wird ein deutlich geringerer Kraftaufwand beim Herstellen einer Form benötig. Sie wird daher in weiterer Folge eingesetzt.



Abb. 4.3-4: eingespannte Schalhaut SH 40 10 mm



Abb. 4.3-5: eingespannte Schalhaut SH 60 10 mm



# Eingesetzte Schalhäute bei der Schaltischvariante Pixelfeld

Beim ausgeführten Konzept des Pixelfeldes werden Elastomermatten mit einer Shorehärte SH40 zur Formabnahme der anschließend verwendeten Sandschalungen eingesetzt. Dazu werden zwei Varianten dieser Matte in verschieden Materialstärken eingesetzt, die sich in ihren Aufgaben nur leicht unterscheiden.

Schalhaut 1 - Verschleißplatte SH40 10mm
Die Schalhaut zur Erstellung der ersten Sandform wird auf das eingestellte Pixelfeld aufgelegt und anschließend der Formsand aufgebracht und verdichtet, um die Zielgeometrie abzubilden. Dabei erfüllt sie zweierlei Aufgaben. Zum einen den Schutz des Pixelfeldes vor eindringendem Sand und zum anderen das genaue Abbilden der gewünschten Globalgeometrie bei gleichzeitigen "Verschmieren" also die möglichst starke Reduktion der kugelkopfartigen Oberfläche der Pixel und somit die Gewährleistung einer gleichmäßigen Oberfläche.

Schalhaut 2 - Verschleißplatte SH 40 2x 25mm Die Schalhaut 2 wird zur Erstellung der zweiten Sandform durch Auflegen auf die erste Sandform genutzt. Sie bildet die Oberfläche der Konterschalung ab. Um die Schubsteifigkeit bei einer gewünschten Materialstärke von 50mm möglichst gering zu halten wurden zwei Elastomermatten mit einer Shorehärte SH 40 übereinanderliegend eingesetzt.

Ergebnis der visuellen Datenerfassung 10 mm Die Materialstärke der Schalhaut verläuft relativ konstant zwischen10,2 mm und 10,6 mm. Über 90% der Schalhaut werden so abgedeckt. Allerdings kulminiert sie zum oberen und unteren Rand auf den letzten ca. 20 Millimetern auf bis zu 11.25mm (Abb. 4.3-12).

Der produktionsbedingte Anstieg der Materialstärke der Matte befindet sich im Randbereich, welcher die Bauteile nicht mehr direkt tangiert. Es ist zu vergleichen, ob und wie die Sandform auf diese geometrische Veränderung reagiert. Dieser Einfluss könnte sich dann auch auf die zweite Sandform auswirken, da diese über die erste Sandform abgenommen wird.

Ergebnis der visuellen Datenerfassung 50 mm Die Materialstärke der beiden Schalhäute in der festgelegten Konfiguration verläuft weniger konstant als die ca. 10mm starke Elastomermatte. Die Materialstärke beträgt zwischen 50,10mm und 51,90mm. Die geringste Materialstärke ergibt sich aufgrund einer Talbildung zur Mitte hin. Zu den Rändern hin steigt die Materialstärke wieder an. Besonders im rechten und linken nach oben hin orientierten Bereich, steigt die Materialstärke großflächig an. Dort bewegt sie sich zwischen 51.70mm und 51.90mm. (Abb. 4.3-13)

Der produktionsbedingte Anstieg der Materialstärke der Matte befindet sich im Randbereich, welcher die Bauteile direkt tangiert. Der mögliche Einfluss auf die Abweichungen ist somit ermittelbar. Da die Ausrichtung der beiden Matten bei Auflage weder zur Sandform, noch untereinander Beachtung fand, sind die Auswirkungen für die bereits produzierten Sandformen rückwirkend nicht mehr nachvollziehbar.

Es wird erwartet, dass sich (je nach Mattenkonstellation) auf allen Rückseiten (in diesem Fall die Oberseiten der Schalung) eine der Figur Abb. 4.3-13 ähnliche Ungenauigkeit einstellt.



Abb. 4.3-10: Messung der Unterlage

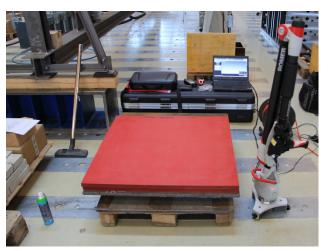


Abb. 4.3-11: Messung der Schalhäute

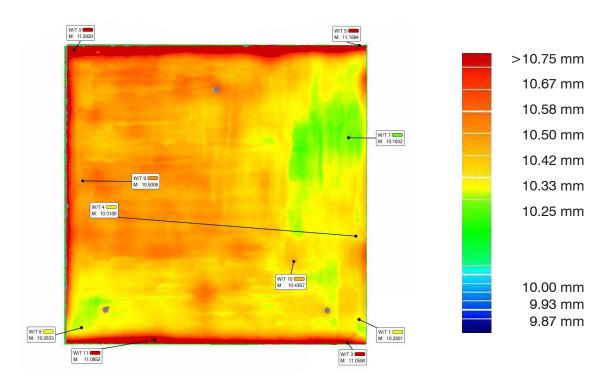


Abb. 4.3-12: Messergebnis der Schalhaut SH 40 10 mm

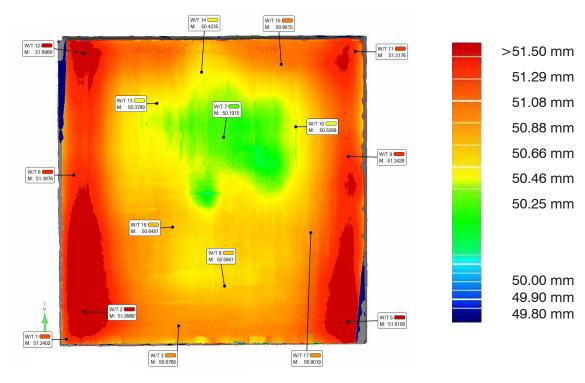


Abb. 4.3-13: Messergebnis der Schalhäute SH 40 2x25 mm



## 4. Ergebnisse und Auswertungen

### 4.4 Die Sandformen

#### Einleitende Erklärung zu den Messergebnissen der Sandformen

Das folgende Kapitel behandelt die Messung und Auswertung der Sandformen, die als Schalung für die Betonbauteile fungieren. Diese Sandformen werden wie folgt hergestellt: Nach dem Einstellen des Pixeltisches wird dieser in eine horizontale Position gedreht, ein 10 mm starke Elastomerplatte als Schalhaut aufgelegt und diese über drei Bolzen, die in die Gewinde der Referenzpixel eingeschraubt werden, punktuell fixiert. Anschließend wird ein Rahmen auf die Schalung aufgelegt und in diesen, der zu verarbeitende Formsand eingebracht, verdichtet und nach dem Aushärtungsprozess abgenommen.

Das Verfahren zur Herstellung der Konterschalung beruht auf dem gleichen Prinzip. Auf die erstellte Sandform wird nun ein Offset durch das Auflegen von zwei 25 mm starken Elastomermatten erzeugt, und von dieser Parallelfläche eine neue Sandform abgenommen.

Potentielle Einflussfaktoren für Abweichungen von der gewünschten Form, welche sich aus diesem Verfahren ergeben könnten und daher im Rahmen der Messung und Auswertung untersucht werden sollen sind:

- Übertrag der Fertigungstoleranzen der Schalhaut auf die Sandform
- Übertrag und Verschmieren der Pixeltextur durch die Schalhaut auf die Formsandformen
- Einfluss der Mehrfachverwendung von Sandformen
- Lokales Rückstellen der Schalhaut aufgrund der Eigensteifigkeit
- Zusammenhang zwischen Krümmung der Schalung und der Deformation der Referenzpixel
- Abweichungen des Pixelfeldes durch die mechanischen Kräfte während der Fertigung

Die Datenerfassung erfolgt visuell. Die direkt vom Pixelfeld abgenommene Sandform (sie wird in der Folge als 3p-Sandform bezeichnet) und die über das Offset der Elastomermatten hergestellte Sandform (sie wird in der Folge als Offset-Sandform bezeichnet), werden an den vier Eck- und den drei Referenzpunkten ausgerichtet. Da bei dieser Ausrichtung eine gewisse Unschärfe der Ergebnisse immanent ist, eignet sie sich nur für qualitative Betrachtungen und für das Erörtern lokaler Abweichungen. Weitere Ausrichtungen werden im darauf folgenden Kapitel behandelt, wenn das Bauteil selbst vermessen und analysiert wird.

Die Beurteilung stellt dabei auch die potentielle Ausrichtung der Schalhäute dem Ergebnis gegenüber und versucht diese zu berücksichtigen. Während der Herstellung der Elemente ist dies nicht erfolgt. Somit ergeben sich für die 3p-Sandform durch die Aussparungen zwei unterschiedliche Ausrichtungen (spiegelverkehrt die Vorder- oder Rückseite,) bei der Seite Offset durch die verschiedenen möglichen Konstellationen bis 63 Varianten, die allerdings nur schwer unterscheidbar sind.

Zur Darstellung der Abweichungen werden zwei verschiedene Skalen verwendet. Die im folgenden Kapitel erklärte Ausrichtungsmethode über vier Eck- und drei Referenzpunkte führt bei der 3p-Sandform zu einer leichten Disbalance der Messergebnisse. Daher wird die Skala um 0.50mm negativ verschoben, reicht von +0.50 bis -1.50mm und hat ihre mittleren Toleranzwerte zwischen von -0.25 und -0.75mm, während die Skala der Offset-Sandformen von +1.00 bis -1.00 mm reicht und ihre mittleren Toleranzwerte zwischen +0.25 und -0.25mm liegen hat.

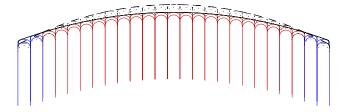


Abb. 4.4-1: Einstellung der Pixelreihe mit Abweichungen negativ (blau) und positiv (rot)

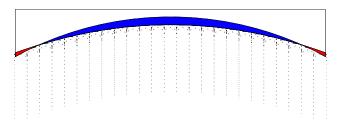


Abb. 4.4-2: Abnahme der Sandform 3p



Abb. 4.4-3: Abweichungen in Form negativer Einbuchtungen (rot) und positiver Ausbuchtungen (blau)

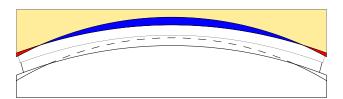


Abb.4.4-4: Abnahme der Sandform Offset



Abb. 4.4-5: Übertrag der Abweichungen, aber Umkehr der Wirkung (negative Einbuchtungen (rot) und positiver Ausbuchtungen (blau)



Abb. 4.4-6: Übertrag der Abweichungen auf das Schalenelement und wiederholte Umkehr der Wirkung auf beiden Seiten (negative Einbuchtungen (rot) und positiver Ausbuchtungen (blau))

#### Abweichungen im Fertigungsprozess

Zum Verständnis der Übertragung von Abweichungen in Folge des Fertigungsprozess werden diese hier noch einmal schematisch dargestellt und exemplarisch erklärt:

1. Einstellung einer Pixelreihe entlang der gewünschten Kurve (Strichlinie) und die real erfolgten Einstellung (schwarz) (Abb. 4.4-1).

Die Abweichung im positiven Bereich, also eine zu weite Einstellung der Pixel wird mit blau und im negativen Bereich, also eine zu geringe Einstellung mit rot illustriert. Dies geschieht, da eine zu hohe Einstellung im Endeffekt zu einer zu geringen Plattenstärke führen würde und umgekehrt. Die Mattenstärke ist bei der Einstellung mitberücksichtigt (Abb. 4.4-2).

- 2. Durch das Abformen der eingestellten Geometrie mittels einer Sandform, werden die positiven Abweichungen zu weit eingestellter Pixel, zu negativen Einbuchtungen in der 3p Sandform (blau dargestellt) und negative Einstellungen zu Ausbuchtungen (rot dargestellt) (Abb. 4.4-3).
- 3. Die Abnahme der Offset Sandform, die ihre Form durch das Auflegen der zwei SH 40 25 mm Matten bekommt, übernimmt somit auch direkt die Abweichungen der 3p Sandform (Abb. 4.4-4). Allerdings wirken hier die Abweichungen wieder umgekehrt und negative Einbuchtungen führen zu Ausbuchtungen, positive Erhöhungen zu Einbuchtungen der Offset Sandform (Abb. 4.4-5 und -6). Dabei ist zu erwarten, dass diese aufgrund des 50 mm starken Offsets, stark verschmieren und schwieriger zu erkennen sind.

# Anordnung und Auswirkung der Ausrichtung gemessenen Formsandschalungen

Zur Interpretation der Messergebnisse wird hier noch einmal auf die gewählte Ausrichtung eingegangen und der zu erwartenden Effekt den alternativen Ausrichtungsmethoden gegenübergestellt.

Als Referenz dienen die digitalen Originalgeometrien, und somit die Zielgeometrien, die auch zur Einstellung verwendet wurden. Alternativ könnten auch die Daten der tatsächlich erfolgten Einstellung überprüft und für eine detailliertere Betrachtung des reinen Übertrags von der Einstellung auf die Sandform verwendet werden. Das Hauptziel ist die Auswertung der Abformgenauigkeit und in diesem Zusammenhang das Aufdecken lokaler Phänomene, wie beispielsweise die Auswirkung von Fertigungstoleranzen der Schalhäute oder mechanische

Einflüsse beim Abformprozess.

Die Ausrichtung der Sandformen ist über grundsätzlich drei Varianten möglich: Über die Referenzpixel, über die eine Anzahl frei gewählter Punkte oder die Best-Fit Methode.

Entscheidend für die Auswahl des adäquaten Ausrichtungssystems sind die Ablesbarkeit der Abweichungen, Überlagerungsgenauigkeit und Vorhersehbarkeit/Nachvollziehbarkeit der Ausrichtung. Wie schon in Kapitel 4.1 allgemein beschrieben, haben die verschiedenen Methoden grundsätzlich unterschiedliche Ausrichtungen zur Folge, die eine spätere Beurteilung vereinfachen oder auch erschweren. Die Strategie ist allerdings nicht für jedes Objekt gleich, sondern richtet sich nach Art der Abweichung und Verhältnis zum Objekt, etc.

Als Ablesbarkeit wird in diesem Zusammenhang die Deutlichkeit der auftretenden Abweichungen bezeichnet. Um Abweichungen genau erkennen zu können, ist es entscheidend eine möglichst genaue Skala zu definieren. Eine Skala von +10 bis -10 mm zeigt eine Abweichung deutlich schwächer an, als eine Skala von +1.0 bis -1.0 mm. Diese Skala wird daher von den zu erwartenden Abweichungen definiert, welche zum einen von den Fertigungsungenauigkeiten, zum anderen von der Überlagerungsgenauigkeiten der aneinander ausgerichteten Objekte abhängen. Diese Überlagerungsgenauigkeit steht wiederum in direktem Verhältnis zur Ausrichtungsmethode.

Die Auswirkungen der Ausrichtungsmethoden über die Eckpunkte oder Referenzpixel sind im Gegensatz zur Best-Fit Variante vorhersehbar, führen aber bei gleicher Abweichung zu unterschiedlichen Ergebnissen, da sie andere Punkte zur Nullposition des Bauteils bestimmen. Betrachtet man vereinfacht die Geometrien von drei Kugelkalotten mit unterschiedlichen Radien als Simulation einer Abweichung der Einstellung in positiver und negativer Richtung, und richtet diese über die Eckpunkte aneinander aus, sind dies die einzigen Kontaktpunkte und es gibt keine weiteren Schnittpunkte der Geometrien (Abb. 4.4-7). Ausgerichtet über die Referenzpixel, bilden sich genau hier die Überschneidung der verschiedenen Geometrien (Abb. 4.4-8).

Die Ausrichtung über die Referenzpixel orientiert die Sandform in gleicher Art, wie das Pixelfeld zur Überprüfung der Einstellungen und stellt somit eine gute Basis zur Analyse und Ableitung dar. Zum Zeitpunkt der Messung waren die ein-

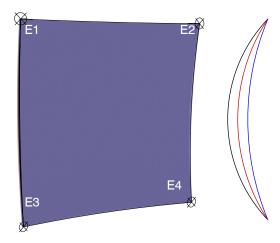


Abb. 4.4-7: Ausrichtung über Eckpunkte - keine Überschneidugen der Geometrie, daher ist auch nur die

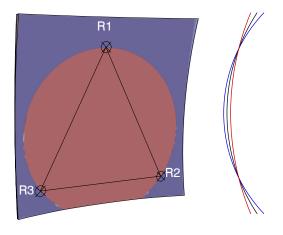


Abb. 4.4-8: Ausrichtung über die Referenzpixel - starke Überschneidung an den Eckpunkten

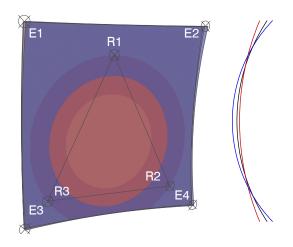


Abb. 4.4-9: Ausrichtung über Referenzpunkte und Eckpunkte - Überschneidung

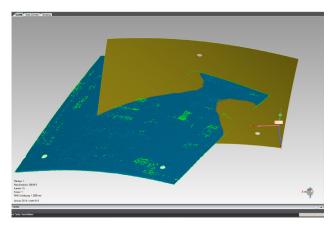


Abb.4.4-10: fehlerhafte Ausrichtung über Best-Fit Methode aufgrund ausreichender Überschneidung

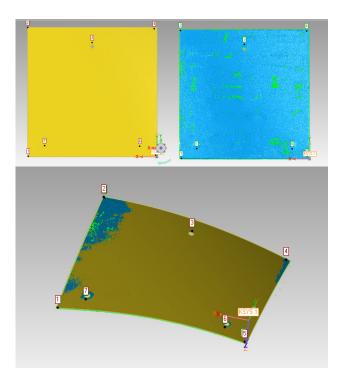


Abb. 4.4-11: Ausrichtung einer Sandform über Eck- und Referenzpunkte

gesetzten Referenzbolzen meist schon wieder in der Produktion im Einsatz, weshalb nicht immer auf sie zurückgegriffen werden konnte und einige Messungen ohne diese Bolzen ausgeführt werden mussten.

Der Vorteil der Best-Fit Methode liegt neben den schon erwähnten und in Kapitel 4.1 beschriebenen generellen Eigenschaften, in diesem Fall in der Gleichartigkeit zur 3p Ausrichtungsmethode. Aufgrund der simplen Geometrie der Elemente (es gibt fast keine Wendepunkte in den Bauteilen), ähnelt die ausgemittelte Positionierung des Objektes sehr der 3p Ausrichtung. Als Ergebnis werden die Abweichungen gleichartig dargestellt, und die Ablesbarkeit steigt. Des Weiteren wird durch die Vielzahl an Ausrichtungspunkten eine Fehlstellung des gesamten Objektes durch die Ausrichtung an einzelnen Spitzen, wie z.B. eine abgebrochene Ecke weitgehend ausgeschlossen. Dies funktioniert allerdings nur bei eindeutig identifizierbaren Objekten. Die Beschaffenheit der zu messenden Objekte erscheint nach mehreren Versuche besonders ungeeignet für diese Methode. Die Kombination aus "großem Bauteil - geringe Formänderung - genaue Kontrolle der Abweichungen" führt zu Missverständnissen bei der automatisierten Ausrichtung. Die zur Überlagerung der Bauteile notwendige Anzahl übereinstimmender Punkte (bei der ersten Orientierung in der Regel 300) sind unter Umständen bei noch sehr schlecht zueinander orientierten Test- und Referenzobjekten erreicht. Als Ergebnis wird ein Objekt als ausreichend genau ausgerichtet ermittelt, das in Wirklichkeit nicht ansatzweise den Anforderungen genügt (Abb. 4.4-10). Diese dem Verfahren immanente und als nachteilig angesehene unkontrollierbare Ausrichtung, disqualifiziert diese Methode als alleinige Auswertungsmethode. Die Ausrichtung über die vier Eckpunkte bietet den Vorteil, dass sie einfach auszuführen, wiederholbar und sehr gut nachvollziehbar ist. Der Nachteil dieser Methode liegt in der großen Auswirkung, die ein falsch gesetzter Ausrichtungspunkt hat; sei es nun durch unsauberes Arbeiten oder durch ein beschädigtes Bauteil. In diesem Fall müssen durch den Verarbeiter

3p-Sandformen – Ausrichtung über die Eck- und Referenzpunkte

ein oder mehrere ergänzende Punkte gesetzt werden um ein möglichst genaues Ergebnis zu

Die Ausrichtung der 3p-Sandformen erfolgt über die vier Eckpunkte und drei den Referenz-

gewährleisten.

pixel naheliegend platzierten Referenzpunkten. Somit soll die größtmögliche Überdeckungsgenauigkeit erreicht werden und eine Nachvollziehbarkeit gewährleistet bleiben. Des Weiteren sind die Sandformen nicht das Endergebnis der Arbeiten, sondern die Unterseite der Betonschalung und die Schalung für die Konterschalung der Offset-Sandform, welche wiederum nur über selbst gewählte Punkte ausgerichtet werden kann (siehe "Sandform Offset - Ausrichtung über die Eck- und Referenzpunkte"). Da die Auswirkungen der Ausrichtung schon während des Prozesses angezeigt werden, kann via "Trial and Error" iterativ an den Punkt angenähert und somit sehr exakt ausgerichtet werden. Auch wird nicht direkt über die Eckpunkte ausgerichtet, da die Kanten teils direkt nach dem Abformungsvorgang mit einer Feile gebrochen wurden und somit eine weitere Abweichung hinzugefügt wurde, die unbeachtet bleiben soll.

Sandform Offset – Ausrichtung über die Eck- und Referenzpunkte

Die Ausrichtung Sandform Offset ist nur noch über die Varianten Best-Fit oder Eck- und Referenzpunkte möglich, da die Referenzpixel bei der Abnahme der Offset Sandform nicht weiter übertragen werden. Die Ausrichtung erfolgt somit wieder über Eck- und Referenzpunkte (Abb. 4.4-11).

#### Darstellung der Ergebnisse

Zur Analyse der Abweichungen und ihrer Entstehung im Fabrikationsprozess, werden im Folgenden die Scans der Einstellung, die davon abgenommene 3p-Sandform und die von dieser wieder abgenommene Offset-Sandform abgebildet. Die auftretenden Abweichungen werden dem Arbeitsschritt zugeordnet, markiert und so die möglichen Ursachen ermittelt. Aufsummierung, Pointierung und Schwächung der Abweichungen werden somit kenntlich gemacht und durch eine abschließende Überlagerung, charakteristische Quellen sichtbar gemacht.

Zum besseren Verständnis, werden die Sandformen der Einstellung folgend ausgerichtet. Die eigentliche Sichtseite der 3p-Sandform wird dazu gespiegelt, die Offset-Sandform um 180° gedreht. Die Abweichungen werden in ihrer tatsächlichen Wirkungsweise dargestellt: Positive Abweichungen des Pixelfeldes werden zu negativen Abweichungen der 3p-Sandform, diese werden zu positiven Abweichungen der Offset-Sandform.

Einleitend wird auch die Einstellungstopographie grafisch dargestellt. Hoch- und Tiefpunkt der Einstellung werden markiert und der Verlauf über eine Farbskala dargestellt. Somit kann ein möglicher Zusammenhang von Einstellungstiefe zu den vorhandenen Abweichung angezeigt werden.

#### Referenzherstellungsmethode Fräsen

Wie schon im Kapitel 1.1 beschrieben wird das Fräsen der Schalungen als Produktionsmethode angesehen, die den Stand der Technik der Herstellung doppelt gekrümmter Betonbauteile definiert, und welche mit dem vorgeschlagenen Prinzip substituiert werden soll. Daher wurden die Schalungen für zwei ergänzende Bauteile des Prototyps mit dem gleichen ABB-Industrieroboter aus dem Holzwerkstoff MDF gefräst und mit UHPC ausgegossen. Sie stellen die Referenz der mit dem am Institut zur Verfügung stehenden Infrastruktur dar und zeigen die mit diesem Verfahren zu erreichenden Genauigkeiten auf. Die Ausrichtung der Schalungen erfolgt über die schon verwendete Methode der Eckund Referenzpunkte.

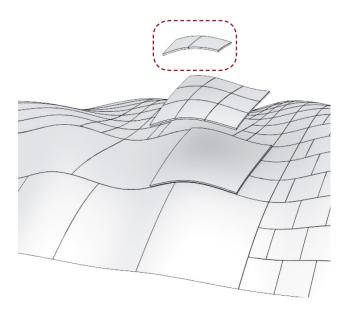


Abb. 4.4-12: ausgewählte der Schalenelemente zur Fertigung mittels Fräsen



Abb. 4.4-13: Fräsbaearbeitung des Bauteils 02 unten, Bearbeitungsrichtung parallel zum Aufspanntisch

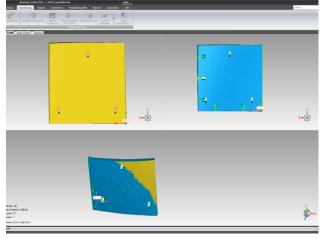
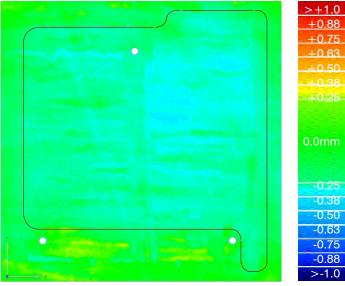


Abb. 4.4-14: Ausrichtung über die beiderseitg ausgearbeiteten insgesamt sechs Referenzpunkte

#### Gesamteindruck der Formgenauigkeit

Der Herstellungsprozess mittels Fräsen erreichte eine Formgenauigkeit der MDF-Schalungen von  $<\pm0.85$  mm. Dieser Wert ist allerdings den erhöhten Abweichungen der Schalungsbauteile REF 1 oben und REF2 oben geschuldet. Bei den unteren Schalungselementen wurde bei 99 % der Messungspunkte eine Genauigkeit von  $<\pm0.50$  mm erreicht.

Um diese permanent zu gewährleisten, müsste der Zusammenhang von Geometrie und Fertigungsgenauigkeit genauer untersucht werden. Dieser deutet sich an, da die größeren Abweichungen jeweils auf der Oberseite, also der konkav gekrümmten Schalung zeigen. Von einer stark unterschiedlichen Kinematik des Roboters als Ursache ist hier nicht auszugehen, da die Fertigung nicht normal zur Oberfläche, sondern parallel zum Aufspanntisch erfolgte.





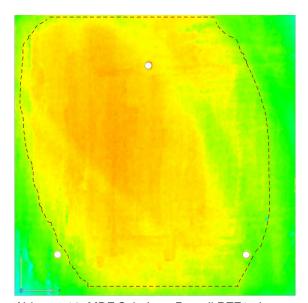


Abb. 4.4-16: MDF Schalung Bauteil REF1 oben

MDF-Form REF1 unten: Die Fertigungsgenauigkeit ist sehr hoch. 87% der gemessenen Punkte befinden sich innerhalb der Toleranz von +0.25 - -0.25 mm. Noch einmal 12% innerhalb der Toleranz von -0.25 - -0.40 mm. Es zeigen sich keine lokalen Nester von Abweichungen.

MDF-Form REF1 oben: Die Fertigungsgenauigkeit ist hoch, aber nicht ganz so hoch, wie die der Unterseite der Schalung. 38,6% der gemessenen Punkte befinden sich innerhalb der Toleranz von +0.25 - -0.25 mm. Noch einmal 38% innerhalb der Toleranz von +0.25 - +0.40 mm und 21,6% innerhalb der Toleranz von +0.40 - +0.55 mm. Es zeigen sich keine lokalen Nester von Abweichungen.

> >+1.0 +0.88+0.75

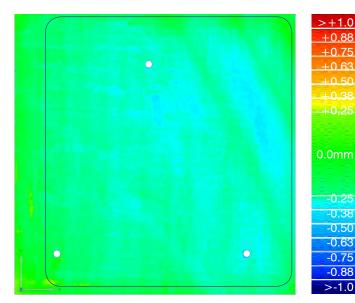


Abb. 4.4-17: MDF Schalung Bauteil REF2 unten

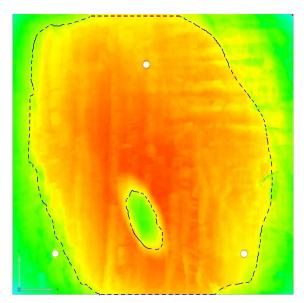


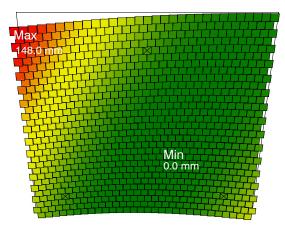
Abb. 4.4-18: MDF Schalung Bauteil REF2 oben

MDF-Form REF2 unten: Die Fertigungsgenauigkeit ist sehr hoch. 79% der gemessenen Punkte befinden sich innerhalb der Toleranz von +0.25 - -0.25 mm. Noch einmal 19,9% innerhalb der Toleranz von -0.25 - -0.40 mm. Es zeigen sich keine lokalen Nester von Abweichungen.

-0.88 -0.50 -0.63-0.75 -0.88 >-1.0

MDF-Form REF2 oben: Die Fertigungsgenauigkeit ist im direkten Vergleich der vier mittels Fräsen hergestellten Schalungselemente am geringsten. Nur 28,5% der gemessenen Punkte befinden sich innerhalb der Toleranz von +0.25 - -0.25 mm. Noch einmal 18.7% liegen innerhalb der Toleranz von +0.25 - +0.40 mm, 23.46% innerhalb der Toleranz von +0.40 - +0.55 mm, 21.1% innerhalb der Toleranz von +0.55 - +0.70 mm und 7.9% bei +0.70 - +0.85 mm. Es zeigt sie eine lokale Abweichung in Form einer Erhebung in der Senke des Schalungselementes.

#### Sandform 1



Verlauf der Einstellungstiefe im Pixelfeld Verfahrweg zwischen 0.0 und 148 mm. Maximale Einstellung wird im Bereich oben links die minimale im mittleren Bereich des Feldes. Ein Zusammenhang zwischen Einstellungstiefe und Abweichung ist im Bereich A2 möglich.

Übertrag über SH 40 10mm auf 3p-Sandform Nach dem Abformen befinden sich von ursprünglichen 78.4 % noch 50.5% der Sandform im Bereich ±0.25mm. Die die Toleranz überschreitenden Abweichungen sind mit 0.8% >-1.50mm und 0.48% >+0.50mm nur marginal vorhanden. Die erhöhenden Einstellungsabweichungen A1 und A2 werden in Quantität und Qualität klar sichtbar übernommen. Die zu geringen Einstellungen bei A3 und A4 sind nicht erkennbar. Die Einspannung der Referenzpixel überträgt sich bei Pixel R2 und R3 in Form lokaler positiver Deformationen. Im Bereich B1 bildet sich eine leichte Senke (-0.5 - -0.75 mm), die nicht in Zusammenhang mit den Einstellungsabweichungen steht. Das Bild der Einstellungen wird von der 3p-Sandform sehr genau abgebildet. Abweichungen zur Einstellung entstehen vorwiegend im negativen Bereich.

Übertrag über SH 40 50mm auf Offset-Sandform Nur noch 11.0% der Messpunkte befinden sich im Bereich ±0.25mm. 34.0% der Abweichungen überschreiten den negativen Toleranzwert von >-1.0mm und 14.9% den positiven von >+1.0mm. Die Charakteristik der Sandform ist weiterhin gutablesbar, der Übertrag der Einstellungen aber kaum noch wahrnehmbar. Dominiert wird das Erscheinungsbild von einer diagonal über das gesamte Feld laufenden Senke C2 und deren korrespondierender Erhebung B1. Als neue Abweichung erscheint die lokale Erhebung C1.Diese Verformung wird den Fertigungstoleranzen der Matten zugeschrieben.

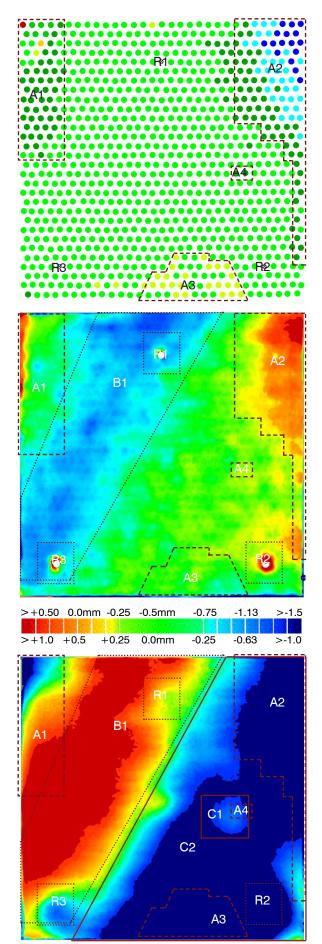
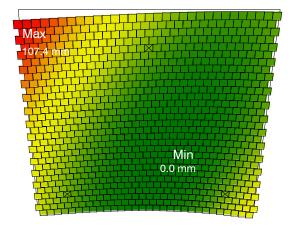
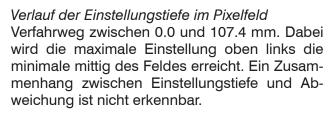


Abb. 4.4-19: Pixelfeld, 3p-Sandform und Offset 1

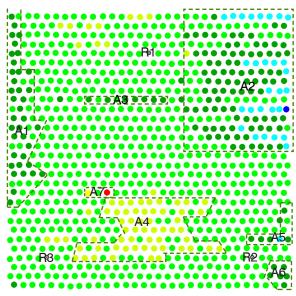


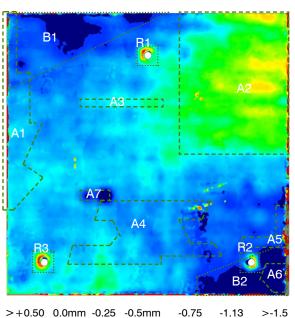


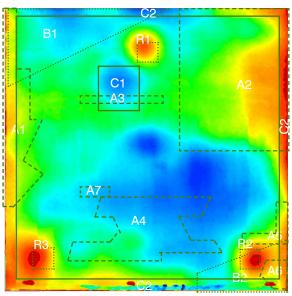


Übertrag über SH 40 10mm auf 3p-Sandform Nach dem Abformen befinden sich von ursprünglichen 72.4 % noch 21.4% der Sandform im Bereich ±0.25mm. Dies ist allerdings in einem Versatz der gesamten Fläche begründet. Legt man diese 0.5mm tiefer befinden sich 58.3% im Bereich ±0.25mm. Die die Toleranz überschreitenden Abweichungen sind mit 3.08% >1.50mm und 0.51% >+1.33mm nur gering vorhanden. Die hohe Anzahl an kleinflächigen Abweichungen wird nur vereinzelt übernommen. A2 und A7 sind die einzig sichtbaren Deformationen. Die Einstellungsungenauigkeiten A1 und A3 - A6 sind nicht mehr erkennbar.

Übertrag über SH 40 50mm auf Offset-Sandform Noch 47.3% von ursprünglichen 58.3% der Messpunkte befinden sich im Bereich ±0.25mm. 0.08% der Abweichungen überschreiten den negativen Toleranzwert von >-1.0mm und 0.94% den positiven von >+1.0mm. Bereich von >-1.0 mm im Bereich C1 dominiert. Die lokale Deformation C1 wird den Fertigungstoleranzen der Matten zugeschrieben. Die scharfkantigen Umrisse C2, welche sich im Scanbild abzeichnen, sind der Mehrfachverwendung der Sandform geschuldet.







0.0mm

-0.25

-0.63

>+1.0 +0.5

+0.25

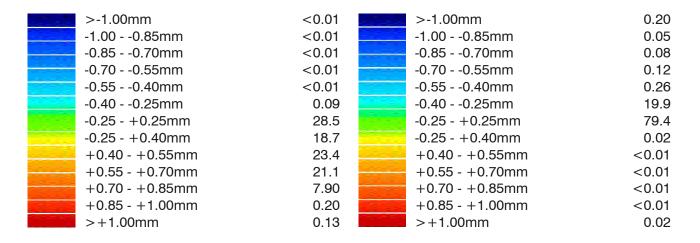
Abb. 4.4-20: Pixelfeld, 3p-Sandform und Offset 5

#### Zusammenfassung Abweichungen der Referenzschalungen MDF

#### Abweichungen MDF-Schalung REF1 oben in % Abweichungen MDF-Schalung REF1 unten in %

>-1.00mm	< 0.01	>-1.00mm	0.26
-1.000.85mm	< 0.01	-1.000.85mm	0.06
-0.850.70mm	< 0.01	-0.850.70mm	0.09
-0.700.55mm	< 0.01	-0.700.55mm	0.11
-0.550.40mm	0.02	-0.550.40mm	0.19
-0.400.25mm	0.18	-0.400.25mm	12.2
-0.25 - +0.25mm	38.6	-0.25 - +0.25mm	87.0
-0.25 - +0.40mm	38.0	-0.25 - +0.40mm	0.06
+0.40 - +0.55mm	21.6	+0.40 - +0.55mm	< 0.01
+0.55 - +0.70mm	1.19	+0.55 - +0.70mm	< 0.01
+0.70 - +0.85mm	0.09	+0.70 - +0.85mm	< 0.01
+0.85 - +1.00mm	0.07	+0.85 - +1.00mm	< 0.01
>+1.00mm	0.30	>+1.00mm	< 0.01

#### Abweichungen MDF-Schalung REF2 oben in % Abweichungen MDF-Schalung REF2 unten in %

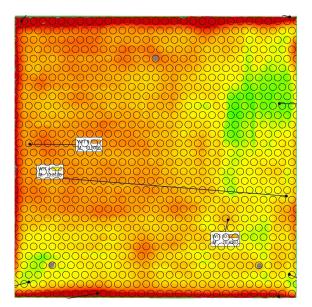


### Zusammenfassung Abweichungen aller Sandformen

Abweichungen 3p-Sandform 1	in %	Abweichungen Offset-Sandform 1	in %
>-1.50mm -1.501.35mm -1.351.20mm -1.201.05mm -1.050.90mm -0.900.75mm -0.750.25mm -0.250.10mm -0.10 - +0.05mm +0.05 - +0.20mm +0.20 - +0.35mm +0.35 - +0.50mm >+0.50mm	0.80 0.28 1.10 5.22 11.4 12.8 50.5 8.40 3.93 2.99 1.39 0.74 0.48	>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	34.0 5.79 4.41 4.03 3.73 3.24 11.0 3.08 3.00 3.26 3.85 5.66 14.9
Abweichungen 3p-Sandform 2	in %	Abweichungen Offset-Sandform 2	in %
>-1.50mm -1.501.35mm -1.351.20mm -1.201.05mm -1.050.90mm -0.900.75mm -0.750.25mm -0.250.10mm -0.10 - +0.05mm +0.05 - +0.20mm +0.20 - +0.35mm +0.35 - +0.50mm >+0.50mm	0.16 0.49 3.20 7.60 13.7 25.9 43.6 2.43 1.28 0.83 0.44 0.18 0.22	>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	1.39 1.28 1.62 1.84 2.31 3.24 18.9 12.1 13.6 16.5 12.8 8.74 7.98
>-1.50mm -1.501.35mm -1.351.20mm -1.201.05mm -1.050.90mm -0.900.75mm -0.750.25mm -0.250.10mm -0.10 - +0.05mm +0.05 - +0.20mm +0.20 - +0.35mm +0.35 - +0.50mm >+0.50mm	0.26 0.06 0.12 0.43 1.67 5.04 59.4 15.2 11.0 4.35 1.43 0.50 0.51	>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	1.54 1.10 1.41 1.93 3.26 5.07 25.6 8.51 8.56 8.56 7.88 10.9 15.7

Abweichungen 3p-Sandform 4	in %	Abweichungen Offset-Sandform 4	in %
>-1.50mm -1.501.35mm -1.351.20mm -1.201.05mm -1.050.90mm -0.900.75mm -0.750.25mm -0.250.10mm -0.10 - +0.05mm +0.05 - +0.20mm +0.20 - +0.35mm +0.35 - +0.50mm >+0.50mm	0.30 0.10 0.45 1.95 6.29 11.0 50.5 8.03 5.79 4.00 4.07 4.38 2.91	>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.70 - +0.85mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	0.78 0.45 0.87 1.50 2.18 3.21 24.3 9.60 9.04 9.65 9.93 7.33 21.2
Abweichungen 3p-Sandform 5	in %	Abweichungen Offset-Sandform 5	in %
>-1.50mm -1.501.35mm -1.351.20mm -1.201.05mm -1.050.90mm -0.900.75mm -0.750.25mm -0.250.10mm -0.10 - +0.05mm +0.05 - +0.20mm +0.20 - +0.35mm +0.35 - +0.50mm >+0.50mm	3.08 4.02 8.20 16.3 27.3 14.7 21.4 2.40 0.44 0.13 0.09 0.07 1.33	>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	0.08 0.52 2.94 6.31 10.2 13.0 47.3 6.32 5.37 3.72 2.14 1.22 0.94
Abweichungen 3p-Sandform 6	in %	Abweichungen Offset-Sandform 6	in %
>-1.50mm -1.501.35mm -1.351.20mm -1.201.05mm -1.050.90mm -0.900.75mm -0.750.25mm -0.250.10mm -0.10 - +0.05mm +0.05 - +0.20mm +0.20 - +0.35mm +0.35 - +0.50mm >+0.50mm	3.82 6.55 13.2 17.1 16.3 11.3 21.1 3.00 2.26 1.34 0.80 0.74 2.57	>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	2.18 1.73 2.12 2.34 2.74 2.80 11.5 4.42 5.28 6.11 7.32 7.81 43.7

Abweichungen 3p-Sandform 7	in %	Abweichungen Offset-Sandform 7	in %
>-1.50mm -1.501.35mm -1.351.20mm -1.201.05mm -1.050.90mm -0.900.75mm -0.750.25mm -0.250.10mm -0.10 - +0.05mm +0.05 - +0.20mm +0.20 - +0.35mm +0.35 - +0.50mm >+0.50mm	0.83 0.47 1.25 3.93 15.0 26.9 42.5 4.61 1.77 0.91 0.63 0.25 1.02	>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.70 - +0.85mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	0.52 0.13 0.39 1.04 1.55 2.39 17.6 11.8 18.4 17.4 15.2 9.06 4.40
Abweichungen 3p-Sandform 8	in %	Abweichungen Offset-Sandform 8	in %
>-1.50mm -1.501.35mm -1.351.20mm -1.201.05mm -1.050.90mm -0.900.75mm -0.750.25mm -0.250.10mm -0.10 - +0.05mm +0.05 - +0.20mm +0.20 - +0.35mm +0.35 - +0.50mm >+0.50mm	1.23 0.20 0.24 0.43 1.92 4.81 37.4 18.8 16.3 7.16 3.85 2.33 5.35	>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	0.67 0.56 0.79 1.15 1.77 3.11 33.0 11.3 10.9 7.95 6.14 5.41 17.2
Abweichungen 3p-Sandform 9	in %	Abweichungen Offset-Sandform 9	in %
>-1.50mm -1.501.35mm -1.351.20mm -1.201.05mm -1.050.90mm -0.900.75mm -0.750.25mm -0.250.10mm -0.10 - +0.05mm +0.05 - +0.20mm +0.20 - +0.35mm +0.35 - +0.50mm >+0.50mm	0.01 0.03 0.07 0.13 0.22 20.8 18.8 21.2 17.1 9.78 5.16 6.71	>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	3.70 2.30 2.87 3.04 3.07 3.44 19.8 7.60 9.00 9.85 13.2 13.2 8.87



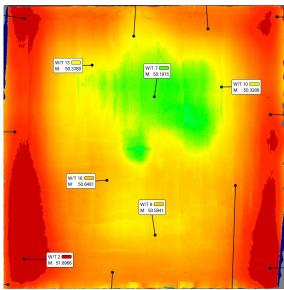


Abb. 4.4-21: Überlagerung Pixelfeld und SH 40 10 mm / 2 x SH 40 25 mm

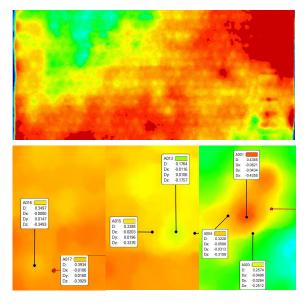


Abb. 4.4-22: Pixeltextur gobal und im Detail

### Potentielle Übertragungsgenauigkeit

Übertrag der Fertigungstoleranzen der Schalhaut auf die Sandform (Abb. 4.4-21)

#### SH 40 10 mm

Die größeren Abweichungen im Randbereich werden kaum auf die Sandform übertragen, da dieser Bereich kaum von den runden Pixelköpfen berührt, und wenn dann doch nur leicht tangiert wird, wie beispielsweise bei Sandform Nr. 2. Somit ist ein Einfluss auf die Formgenauigkeit der von dieser Seite abgenommenen Schalenelemente als gering anzusehen. Ein Übertrag auf die hiervon abgenommene Konterschalung ist allerdings möglich. Die Abweichungen im Zentrum betragen weniger als 0.3 mm und verlaufen sehr homogen von rechts nach links. Sie sind daher nicht mehr ermittelbar.

#### SH 40 2 x 25 mm

Es können einige lokale Vertiefungen in den Sandformen mit den Fertigungstoleranzen in Zusammenhang gebracht werden. Dies betrifft vor allem die zentralen Bereiche der Sandschalungen, wo die Schalhaut markante Abweichungen aufweist. Die großen Abweichungen im Randbereich können erst durch die Betrachtungen der fertigen Betonelemente untersucht werden, da die Bestfit- Ausrichtung der Sandformen verschleiernd wirkt.

Übertrag und Verschmieren der Pixeltextur durch die Schalhaut auf die Formsandformen

Als Pixeltextur werden die lokalen Vertiefungen im Bereich der Zwischenräume der Pixelköpfe bezeichnet, die durch das Einbringen und Verdichten des Formsandes und sein Eigengewicht entstehen. Auf das Gesamtbild übertragen entsteht so eine Textur, die mit der Oberflächenbeschaffenheit eines Golfballs angemessen beschrieben werden kann. Die Eindrucktiefe bewegt sich bei als schwach bezeichneter Textur im Bereich von ~0,05 - 0.1 mm, bei mittelstarker Textur ~0,1 - 0.15 mm und bei starker Textur ~0,15 - 0.30 mm (Abb. 4.4-22). Der Faktor des Verdichtungsprozess bleibt eine unbekannte Einflussgröße. Aufgrund der geringen Abweichung und des, im Zusammenhang mit der Sandschalung stehenden matten Erscheinungsbilds der Betonoberfläche, werden diese Abweichungen bei einer reinen Betrachtung der Betonbauteile aber kaum wahrgenommen.

Einfluss der Mehrfachverwendung von Sandformen

Bei der Betonage lagern sich auf der Oberfläche der Sandschalung Zementschlämme ab und verbleiben in Form einer dünnen Schicht. Aufgrund der im Randbereich fixierten Randabschalung hat dort keine Ablagerung stattgefunden. Gleiches gilt für die Bereiche, in der die Einbauteile der mechanischen Verbindungselemente platziert wurden. Die Sandformen 3, 4, 5 und 6 wurden zweimal verwendet. Nach der Abnahme der Form und anschließender Säuberung der Sandform tragen die verbliebenen Zementschlämme noch mit 0.10 mm – 0.15 mm auf, wie die Messung an der 3p-Sandform Nr. 4 illustriert (Abb. 4.4-23). Diese bildet sich allerdings nicht sichtbar bei den in weiterer Folge betonierten Bauteilen. Auch kann keine Veränderung der Sichtbetongualität festgestellt werden, weshalb eine zumindest einmalige Weiterverwendung problemlos erscheint.

Zusammenhang zwischen Krümmung der Schalung und der Deformation der Referenzpixel
Die Ausbildung der Krümmung der Einstellung hat keine direkte Auswirkung auf die lokale Deformation der Schalhaut. Die vorgenommene Einspannung über die drei Referenzpixel führt bei Einstellung in Kombination mit dem Einbringen des Formsandes zu einer lokalen Deformation der Schalhaut. Diese ist in Form der Abweichung unabhängig von der eingestellten der Krümmung. Es ergibt sich bei allen neun Einstellungen eine im Durchmesser ca. 50-60 mm betragende und bis zum 2 mm tiefe Senke, die sich auch auf die Offset-Form überträgt, dort aber deutlich weniger sichtbar ist (Abb. 4.4-25).

Lokales Aufstellen der Schalhaut aufgrund der Eigensteifigkeit

Es konnte kein lokales Aufstellen, weder der Schalhaut SH40 10 mm noch der der Schalhaut-kombination 2x 25 mm, beobachtet werden. Die Auftragsmenge des Formsandes und die Elastizität der Schalhäute können in dem bearbeiteten Krümmungsradius als geeignet angesehen werden (Abb. 4.4-24).

Abweichungen des Pixelfeldes durch die mechanischen Kräfte während der Fertigung Während des Fertigungsprozess der Sandformen ist der Pixeltisch einigen mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt. Dabei sind die auftretenden Kräfte während des Einbringens und Verdichtens der Sandform das größte Risiko für ein nachträgliches Verstellen des Pixelfel-

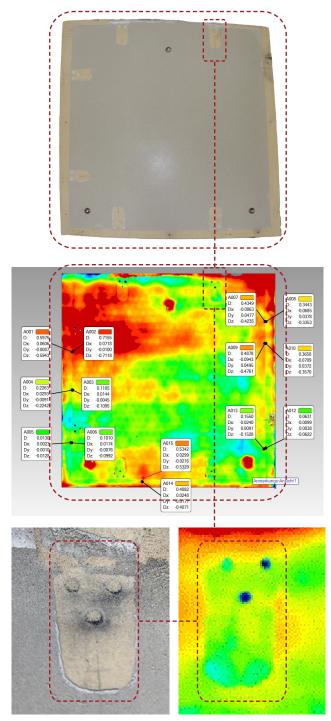


Abb. 4.4-23: Wiederverwendete Sandform Nr. 4 und Messergebnis mit charaktereistischen Abweichungen

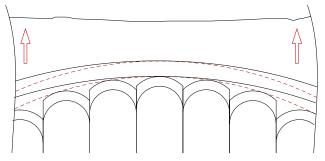


Abb. 4.4-24: Potentielles Aufstellen der Schalhaut aufgrund der Eigensteifigkeit

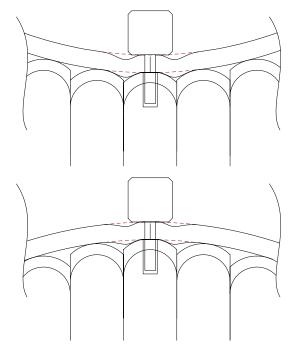


Abb. 4.4-25: Lokale Abweichung im Bereich der Referenzpixel unabhängig von Krümmung der Schalhaut

des und somit einer partiellen Formabweichung (Abb. 4.4-26). Da der Verdichtungsprozess entgegen der Einstellungsrichtung durchgeführt wird, kann eine hieraus resultierende Abweichung ausschließlich in Form negativer Abweichungen erfolgen. Ein grobes Verschieben oder gar globales Kollabieren der Schalung ist aber während des gesamten Herstellungsprozesses nicht erfolgt.



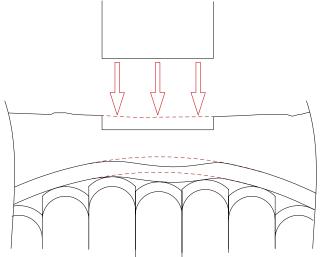


Abb. 4.4-26: Potentielle Abweichungen aufgrund des Verdichtungsprozesses der Formsandschalung

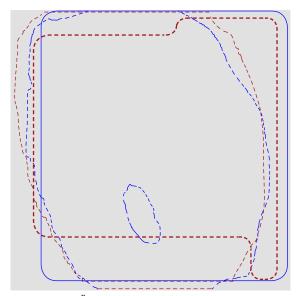


Abb. 4.4-27:Überlagerung Abweichungen REF 1 &2

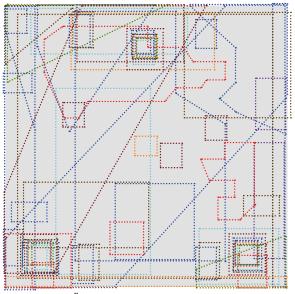


Abb. 4.4-28:Überlagerung Abweichungen 3p 1-9

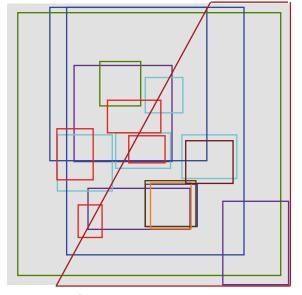
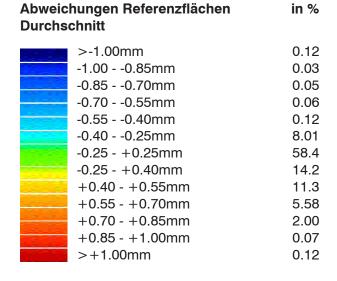
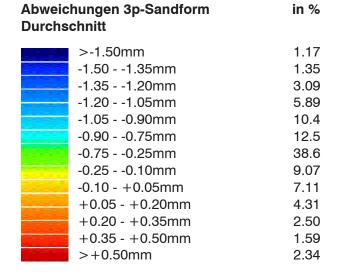


Abb. 4.4-29:Überlagerung Abweichungen Offset 1-9





### Abweichungen Offset-Sandform Durchschnitt

>-1.00mm	4.98
-1.000.85mm	1.54
-0.850.70mm	1.94
-0.700.55mm	2.58
-0.550.40mm	3.42
-0.400.25mm	4.39
-0.25 - +0.25mm	23.2
-0.25 - +0.40mm	8.30
+0.40 - +0.55mm	9.24
+0.55 - +0.70mm	9.22
+0.70 - +0.85mm	8.72
+0.85 - +1.00mm	7.70
>+1.00mm	15.0

#### Beurteilung der Formgenauigkeit

#### Angestrebte Maß- und Formgenauigkeit

Die angestrebte Maß- und Formgenauigkeit der Schalung wurde zu Beginn der Forschungsarbeiten nicht exakt spezifiziert, da ein Teil des entwickelten System, die Verbindungsmethode über eine trockene über verankerte Verbindungsmittel verschraubte Fuge, zeitgleich entwickelte und getestet wurde.

Die in diesem Kapitel beschriebenen und vermessenen Referenzbauteil REF1 und REF2 die mittels des institutseigenen Industrieroboters aus MDF-Blöcken gefräst wurden, bilden daher die Referenz für die erreichbaren Formgenauigkeiten. Die Gewichtung dieser Formgenauigkeit hat bei der angedachten Fügetechnik nicht nur ästhetische Auswirkungen, sondern steht in direktem Zusammenhang mit der Deckungsgleichheit der beiden Kontaktfläche zweier aneinander anschließender Schalenelemente und somit der möglichen Lastübertragung zwischen diesen.

#### Abschlussanalyse der aufgetretenen Abweichungen

Die identifizierten Abweichungen konnten mit den bisherigen Analysen größtenteils aber nicht restlos und zweifelsfrei einer Ursache zugeordnet werden. Die Vielzahl der möglichen Quellen für Abweichungen und deren Überlagerung macht eine eindeutige Ursachenforschung im Nachhinein nicht mehr möglich. Diese müsste in gesonderten Tests erfolgen, welche die hier ermittelten Faktoren und ihren Auswirkung dezidiert untersuchen und nicht mehr Bestandteil dieser Arbeit sind.

Festzustellen ist, dass sich die Formabweichungen signifikant erhöhen. Die durchschnittliche Einstellgenauigkeit des Pixelfeldes von 76.8% innerhalb der minimalen und maximalen Nominalwerte von  $\pm 0.25$ mm verringert sich auf 38.6% bei der 3p-Sandform und auf 23.2% bei der Offset-Sandform.

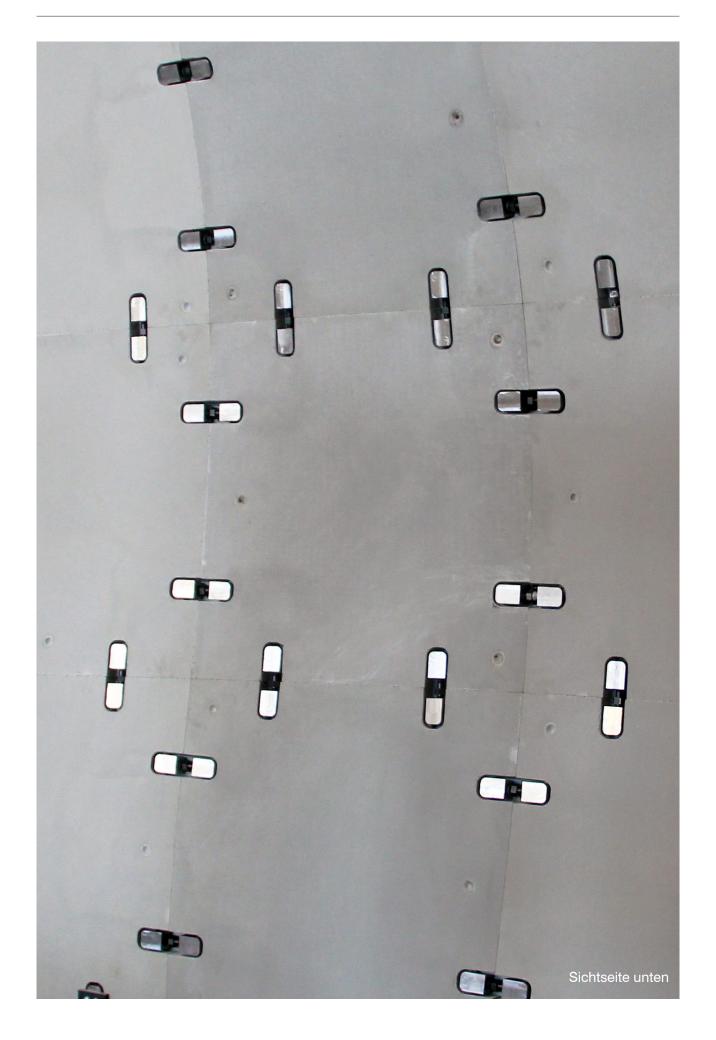
Bauteil	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ø
Pixelfeld % 3p-Sandform % Offset-Sandform %	78.4 50.5 11.0	70.9 43.6 18.9	65.2 59.4 25.6	n.b. 50.5 24.3	72.4 21.4 47.3	n.b. 21.1 11.5	85.5 42.5 17.6	83.1 37.4 33.0	76.0 20.8 19.8	38.6

Abweichungen innerhalb der minimalen und maximlaen Nomialwerte

Im Resultat ist die Fertigungsgenauigkeit der gefrästen Referenzschalungen mit 58.4% im Bereich ±0.25mm höher, als die der 3p-Sandform (38.6%) und die der Offset-Sandform (23.2%), obwohl der robotische Herstellungsprozess der Einstellung des Pixelfeldes mit 76.8% die genauesten Werte im Vergleich liefert. Werden die zur Produktion verwendeten Elementen, und hier vor allem die Schalhaut aber auch die Pixel, mit geringeren Toleranzen eingesetzt ist eine exaktere Abbildung der Einstellung möglich. Weitere Maßnahmen werden im Kapitel 5 erläutert.

Durchschnitt mm	>-1.00	-1.000.25	-0.25 - +0.25	+0.25 - +1.00	>+1.00
Referenz gefräst %	0.12	8.39	58.4	33.15	0.12
3p-Sandform %	1.17	33.23	38.6	24.58	2.34
Offset-Sandform %	4.98	13.87	23.2	43.18	15.0

Durchschnittliche Abweichungen der drei verschiedenen Formtypen



### 4. Ergebnisse und Auswertungen

### 4.5 Die Sichtflächen

#### Messprozeduren, Datenerfassung und Auswertung

#### Einleitung

Das folgende Kapitel behandelt die Messung und Auswertung der Fertigungsgenauigkeit der Sichtflächen. Die Separierung und getrennte Betrachtung von Sicht- und Kontaktflächen der gefertigten Schalenelemente begründet sich in der Fertigungsmethode. Während die Kontaktflächen in einem völlig neuen Bearbeitungsschritt entstehen, sind die Sichtflächen das Endergebnis des in den vorherigen Kapiteln untersuchten Fertigungsprozesses.

Die in der Fertigungsfolge entstandenen Ergebnisse Pixelfeld, 3p-Sandform und Offset-Sandform, haben Abweichungen des Produktionsprozesses generiert oder aufgenommen, andere wiederum kaschiert und ein, der Fertigungstechnik charakteristisches Bild erzeugt, welches bei der Betonage mitübernommen und im erstellten Schalenelement abgebildet wird. Daher sind die entscheidenden neuen Faktoren, der zu weiteren relevanten Abweichungen führen könnten, vor allem die exakte Positionierung und der Verbleib der beiden Formsand-Schalungselemente während des Betoniervorgangs. Das Schwinden des Betons kann vernachlässigt werden, da es sich bei der verwendeten Betonmischung im Bereich von 0,8 -1,0 ‰ bewegt<sup>71</sup> was einer Materialstärkenänderung von <0.05 mm entspricht.

Dennoch wird die Übernahmegenauigkeit der Sandform durch einen Vergleich der Sichtfläche und der Sandform überprüft. Aufgabe der folgenden Analyse ist die Beurteilung der geometrischen Übereinstimmung und Abweichungen in Form von Maß- und Formgenauigkeit, nicht andere fertigungsrelevante Faktoren wie beispielsweise die Sichtbetonqualität, etc.

Die Datenerfassung erfolgt visuell. Die fertigen Bauteile werden verschiedenen Ausrichtungsprozeduren unterzogen. Sie werden sowohl an den drei Referenzpunkten ausgerichtet, welche in die dafür vorgesehenen Aussparungen der Formsandform eingesetzt wurden, als auch nach der Best-Fit Methode und untereinander verglichen.

Als Referenz dienen die mittels der gefrästen MDF-Schalungen hergestellten Referenzschalenbauteile REF1 und REF2. Die Ausrichtung dieser Elemente erfolgt über die sechs eingefrästen Referenzpunkte. Sie ähnelt damit sowohl der Ausrichtungsmethode 3p und der acht Eckpunkte.

Wie bei der Auswertung der Pixelfeldeinstellung beschreiben die positiven Werte eine Geometrie, die über den gewünschten Wert hinausgeht, also zu einem dickeren Bauteil führt, die negativen Werte eine niedrige Materialstärke des Bauteils. Wie schon bei der Analyse der Sandformen reicht der nominale Toleranzbereich von +0.25 mm bis -0.25 mm, der kritische von +1.00 mm bis -1.00 mm.

Diese Skala dient ebenfalls zur Darstellung der Variationen der Wandstärke, was bei einer gewünschten Materialstärke der Bauteile von 50 mm einen nominalen Toleranzbereich von 49.75 mm bis 50.25 mm und einen kritischen Toleranzbereich von 49.00 mm bis 51.00 mm bedeutet.

Abb. 4.5-1: Detailaufnahme eines betonierten Referenzkegelabdrucks

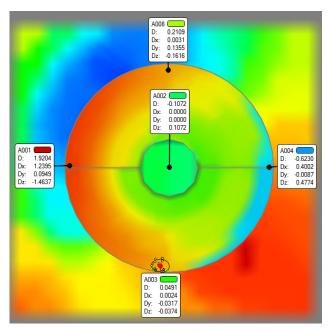


Abb. 4.5-2: Messung der Formgenauigkeit des dargestellten Abdrucks



Abb. 4.5-3: Einmesskegel und Abdruck des Referenzkegels

### Übertragungsgenauigkeit und Unschärfen

Referenz- und Einmesskegel

Die ursprünglich angestrebte Ausrichtungsmethode rein über die Referenzpixel, hat sich zur Messung und Analyse des geforderten Genauigkeitsbereichs, als nur bedingt zielführend herausgestellt. Die im Beton eingeprägten Kegelstümpfe der Referenzpixel bilden die Einstellung in den geforderten Genauigkeitsbereichen grundsätzlich gut ab, dennoch sind eine Bestimmung der exakten Position in x- und y-Achse und besonders in Z-Richtung schwierig. Die Auswirkungen werden im Analyseteil dieses Kapitels noch genauer betrachtet.

Auch ist die Formgenauigkeit nicht hoch genug um als eindeutige Referenz zu funktionieren. Die in Figur Abb. 4.5-1 dargestellte detaillierte Betrachtung eines Referenzkegels weist Abweichungen >1.0 mm im Bereich des im Durchmesser nur 15 mm messenden Kegelstumpfes auf (Abb. 4.5-2). Diese Abweichungen führen zu einer weiteren Unschärfe der Messergebnisse und sollte bei genauerer Analyse noch optimiert werden.

Dieser Umstand erklärt auch die mangelnde Eignung einer im Zuge der Datenerfassung der Schalenelemente durchgeführten zusätzlichen Aufnahme der Referenzpunkte.

Um eine exakte taktile Messung der zentralen Punkte der Referenzkegel zu ermöglichen wurde ein zylindrisch durchgebohrter Kegelstumpfgefertigt, dessen Außenform der Geometrie der Referenzpixel entspricht und dessen Bohrung einen Innendurchmesser von 7.0mm beträgt und somit dem Kugeldurchmesser der mittleren Messspitze des Messarms entspricht. Ziel war, über das taktile Erfassen der Referenzkegelmittelpunkte und die Überlagerung mit dem digitalen Mittelpunkten eine möglichst exakte Ausrichtung zu ermöglichen (Abb. 4.5-3 und -4).

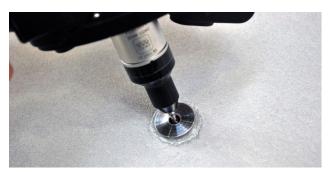


Abb. 4.5-4: taktile Erfassung eines Referenzmittelpunktes mittels des Einmesskegels

Diese Aufnahmemethode scheint grundsätzlich sehr präzise zu sein sollte in folgenden Studien noch einmal genauer betrachtet werden, da diese Methode softwarebedingt einen anderen Umgang mit dem digitalen Modell erfordert. Beispielsweise müsste die Ausrichtung der Objekte vor der Vereinigung der Rohdaten erfolgen, etc. So konnte mit dieser Technik unter den gegebenen Voraussetzungen kein entscheidender Genauigkeitsgewinn erreicht werden.

### Fehlbetonage und Kontrollmechanismus der Betonage

Bei den ersten Betonagen sind die beiden Schalungshälften, aufgrund der mechanischen Belastung des Rüttelns und des Schalungsdrucks, an der Unterseite teilweise aufgegangen. Als Ergebnis stellten sich hohe Schwankungen in der Materialstärke der gefertigten Bauteile ein. Für diesen Vorgang charakteristisch war eine Erhöhung der Materialstärke im unteren Bereich des Bauteils von >+3,0 mm. Sie wurde bei einem ersten Scan der entschalten Elemente vor der Bearbeitung der Kontaktflächen nachgewiesen. Die Bauteile 3, 4, 5 und 6 wurden aus diesem Grund nochmalig gefertigt. Dazu wurden die Schalungselemente von den verbliebenen Zementschlämmen gesäubert und nach Ausbesserung der Verschraubungslöcher von Verbindungselementen und Abstandshalter wiederverwendet.

Um ein solches Verhalten bei der folgenden Fertigung auszuschließen, wurden die Formsandelemente in der Folge eingangs (Abb. 4.5-3) und mittels eines sensorischen Systems während der Betonage kontrolliert.

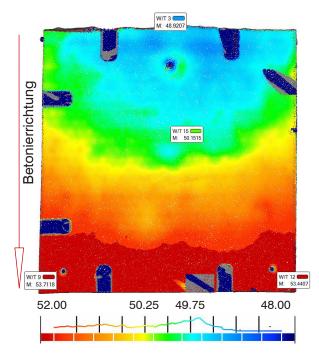
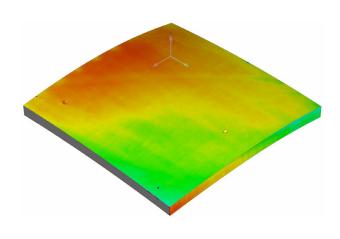


Abb. 4.5-5: Messergebnis der Materialstärke der ersten Betonage des Schalenelementes 04



Abb. 4.5-6: Messung des Abstandes einer zusammengebauten Schalung (ohne Randabschalung)

#### Sichtflächen Referenzelement REF1



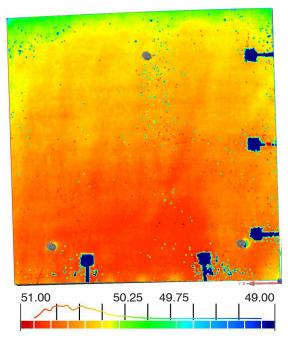
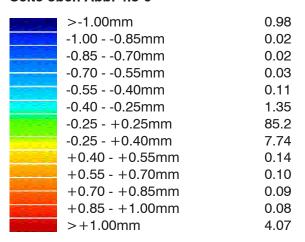
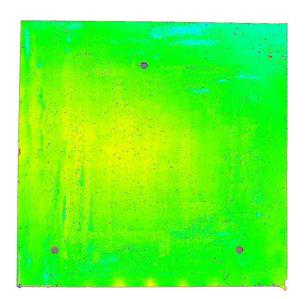


Abb. 4.5-8: Wandstärke

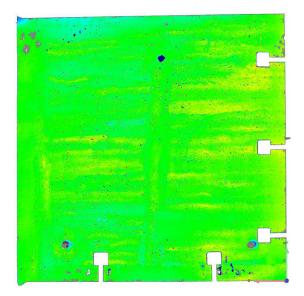
# Übertragungsgenauigkeit Best-Fit in % Seite oben Abb. 4.5-9

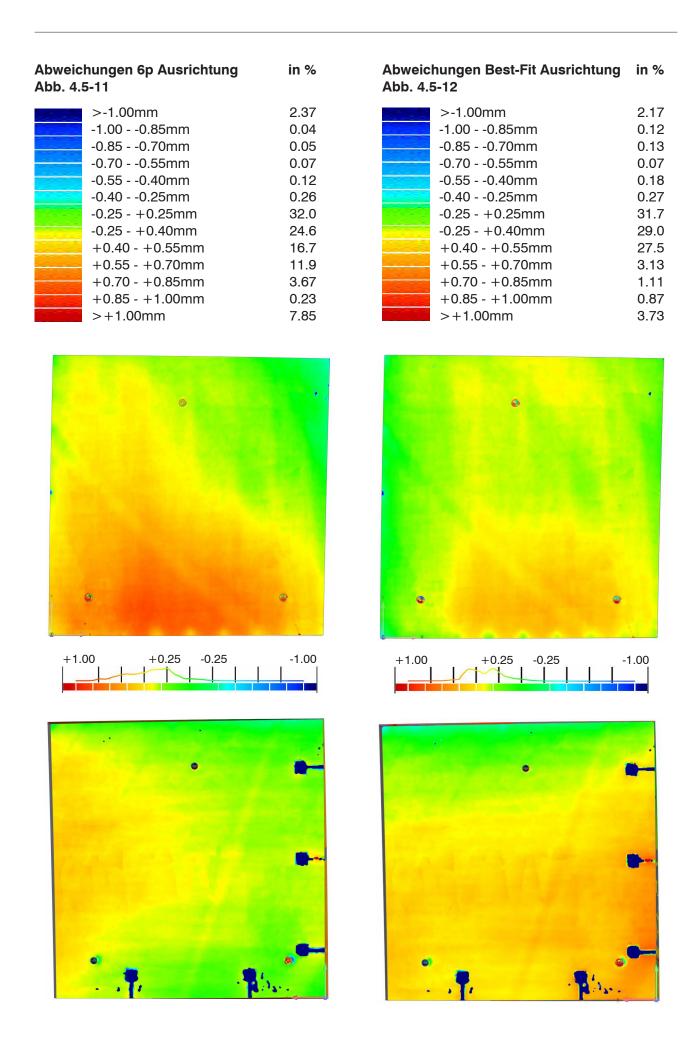




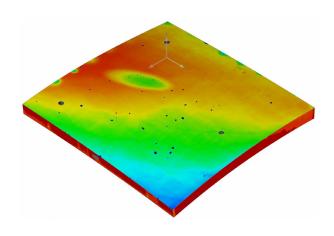
# Übertragungsgenauigkeit Best-Fit in % Seite unten Abb. 4.5-10

>-1.00mm	5.79
-1.000.85mm	0.09
-0.850.70mm	0.10
-0.700.55mm	0.12
-0.550.40mm	0.15
-0.400.25mm	0.28
-0.25 - +0.25mm	90.5
-0.25 - +0.40mm	1.53
+0.40 - +0.55mm	0.06
+0.55 - +0.70mm	0.03
+0.70 - +0.85mm	0.03
+0.85 - +1.00mm	0.02
>+1.00mm	1.32





#### Sichtflächen Referenzelement REF2



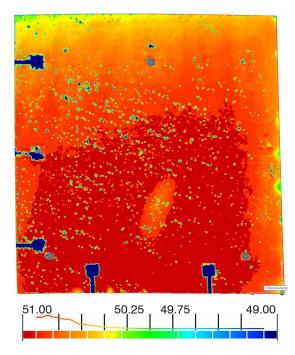
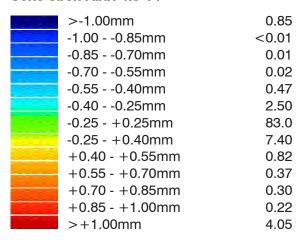
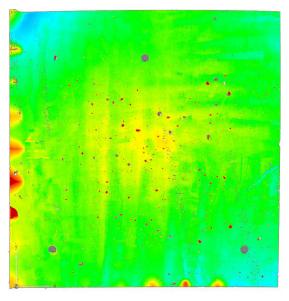


Abb. 4.5-13: Wandstärke

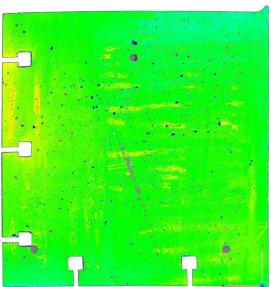
# Übertragungsgenauigkeit Best-Fit in % Seite oben Abb. 4.5-14





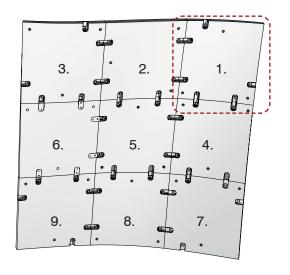
# Übertragungsgenauigkeit Best-Fit in % Seite unten Abb. 4.5-15

>-1.00mm	6.00
-1.000.85mm	0.14
-0.850.70mm	0.16
-0.700.55mm	0.18
-0.550.40mm	0.23
-0.400.25mm	0.35
-0.25 - +0.25mm	89.3
-0.25 - +0.40mm	2.09
+0.40 - +0.55mm	0.33
+0.55 - +0.70mm	0.08
+0.70 - +0.85mm	0.05
+0.85 - +1.00mm	0.04
>+1.00mm	1.06



Abweichungen 6p-Ausrichtung Abb. 4.5-16	in %	Abweichungen Best-Fit Ausrichtung Abb. 4.5-17	in %
>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	2.82 0.27 0.35 0.65 1.18 2.09 13.1 9.49 15.5 13.8 11.2 12.6 16.9	>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	3.14 0.28 0.30 0.29 0.29 0.34 12.6 15.9 33.0 19.8 5.28 3.12 5.57
+1.00 +0.25 -0.25	-1.00	+1.00 +0.25 -0.25 -1.0	00

### Sichtflächen Schalenelement 1



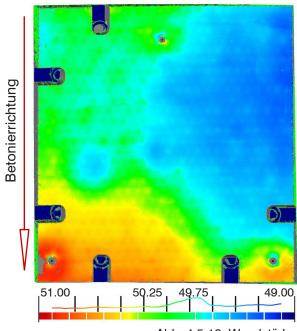
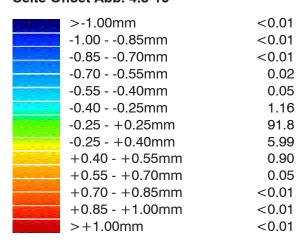
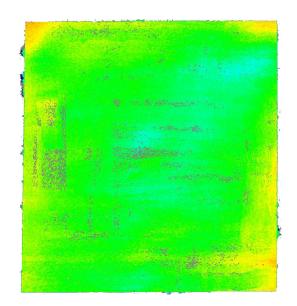


Abb. 4.5-18: Wandstärke

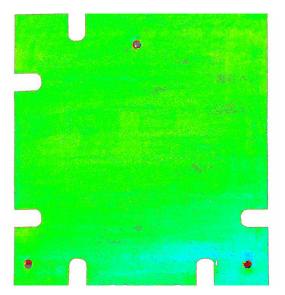
### Übertragungsgenauigkeit Best-Fit in % Seite Offset Abb. 4.5-19



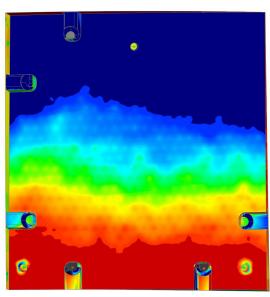


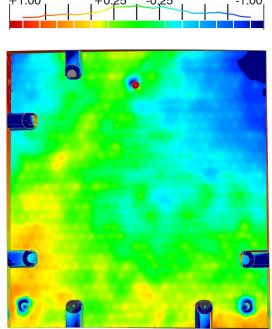
# Übertragungsgenauigkeit Best-Fit in % Seite 3p Abb. 4.5-20

>-1.00mm	0.38
-1.000.85mm	0.28
-0.850.70mm	0.50
-0.700.55mm	0.27
-0.550.40mm	0.27
-0.400.25mm	1.66
-0.25 - +0.25mm	96.0
-0.25 - +0.40mm	0.25
+0.40 - +0.55mm	0.08
+0.55 - +0.70mm	0.06
+0.70 - +0.85mm	0.04
+0.85 - +1.00mm	0.02
>+1.00mm	0.09

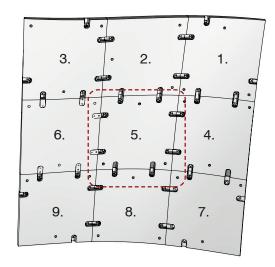


bweichungen 3p Ausrichtung bb. 4.5-21	in %	Abweichungen Best-Fit Ausrichtung Abb. 4.5-22	in %
>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.40 - +0.55mm +0.70 - +0.85mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	20.4 3.21 3.20 3.93 4.50 8.09 17.5 4.61 4.16 3.58 3.90 4.00 18.9	>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	2.15 5.60 6.85 10.3 43.7 4.75 4.55 3.1 1.1 2.56
+1.00 +0.25 -0.25	-1.00	+1.00 +0.25 -0.25	-1.00





### Sichtflächen Schalenelement 5



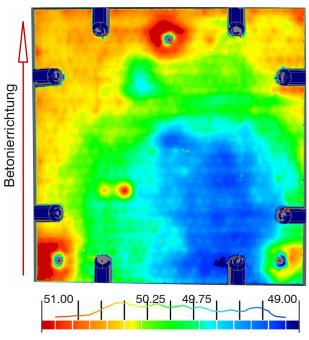
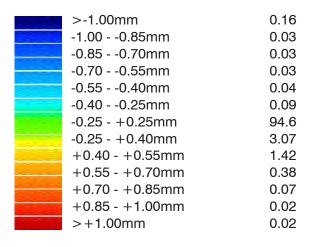
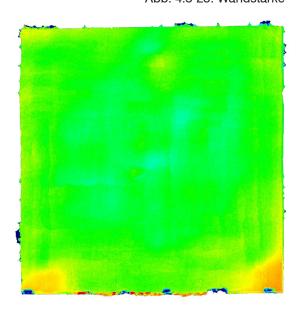


Abb. 4.5-23: Wandstärke

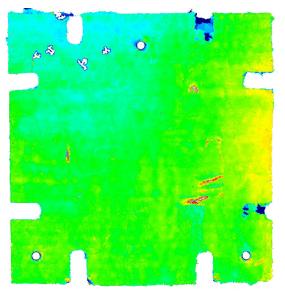
# Übertragungsgenauigkeit Best-Fit in % Seite Offset Abb. 4.5-24





### Übertragungsgenauigkeit Best-Fit Seite 3p Abb. 4.5-25

>-1.00mm	0.05
-1.000.85mm	0.04
-0.850.70mm	0.05
-0.700.55mm	0.09
-0.550.40mm	0.19
-0.400.25mm	5.18
-0.25 - +0.25mm	89.3
-0.25 - +0.40mm	4.19
+0.40 - +0.55mm	0.19
+0.55 - +0.70mm	0.06
+0.70 - +0.85mm	0.03
+0.85 - +1.00mm	0.03
>+1.00mm	0.11



in %

Abweichungen 3p Ausrichtung Abb. 4.5-26	in %	Abweichungen Best-Fit Ausrichtung Abb. 4.5-27	in %
>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	10.2 3.17 3.82 4.37 5.47 6.32 24.9 11.2 13.5 9.45 3.80 1.11 2.80	>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	4.57 2.58 3.63 3.59 3.84 5.26 50.0 16.0 6.10 2.20 0.62 0.51 1.16
+1.00 +0.25 -0.25	-1.00	+1.00 +0.25 -0.25	1.00

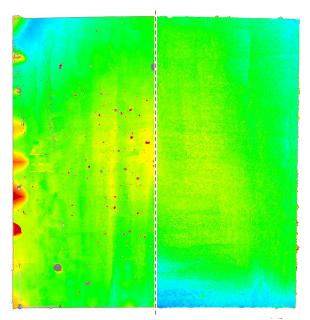
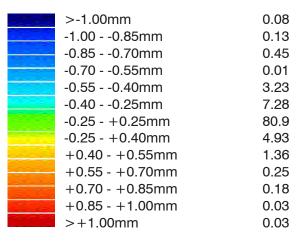


Abb. 4.5-28: Im Verhältnis starke Lunkerbildung bei der MDF-Schalung (links) kaum erfassbare Lunkerbildung bei der verwendeten Sandschalung (rechts)

Durchschnitt Abformgenauigkeit	in %
Best-Fit Seite 3p	

>-1.00mm	0.08
-1.000.85mm	0.05
-0.850.70mm	0.07
-0.700.55mm	0.06
-0.550.40mm	0.09
-0.400.25mm	1.04
-0.25 - +0.25mm	91.8
-0.25 - +0.40mm	4.90
+0.40 - +0.55mm	1.50
+0.55 - +0.70mm	0.32
+0.70 - +0.85mm	0.03
+0.85 - +1.00mm	0.01
>+1.00mm	0.05

### Durchschnitt Abformgenauigkeit in % Best-Fit Seite Offset



#### Gesamteindruck der Formgenauigkeit

MDF-Schalung vs. Formsand-Schalung
Die mittels der MDF-Schalungen und die mittels der Sandschalung hergestellten Betonbauteile weisen keine erkennbaren Unterschiede
bezüglich Abformgenauigkeit der Flächen oder
Maß- und Formgenauigkeit der Bauteile auf. Der
einzig visuelle erfassbare Unterschied manifestiert sich in der Oberflächenqualität der Bauteile.
Die im Formsand betonierten Schalenelemente
weisen eine deutlich geringere Lunkerbildung
an der Oberfläche auf, als die Referenzbauteile
(Abb. 4.5-28).

Abformgenauigkeit von Formsand auf Beton Zur Überprüfung der Abformgenauigkeit wurden die Scans der Sichtflächen der entschalten Betonbauteile mit den Sandformen verglichen. Im Unterschied zu dem zusätzlich ausgeführten Abgleichen der gesamten Bauteile, werden hierbei nur die jeweiligen Sichtflächen 3p und Offset von Bauteilen und Sandform über die Best-Fit Methode zueinander ausgerichtet. Dadurch bleiben weitere Faktoren wie beispielsweise die Bauteilstärke unberücksichtigt.

Da die Sandform deutlich größer ist, als die fertigen Bauteile, ist der reine Abgleich über eine Best-Fit Ausrichtung nicht möglich. Ihm muss eine grobe Vorausrichtung der Bauteile über die N-Punkt Methode vorgeschaltet werden. Erst die finale Feinanpassung erfolgt über die Best-Fit Methode, die nur noch kleine Anpassungen erlaubt.

Die durchschnittliche Übertragungsgenauigkeit aller mittels Sandform hergestellter Bauteile wurde mit 86.4% ±0.25mm gemessen (87.0% bei den Referenzbauteilen). Diese stellen einen Mittelwert dar und verteilen sich auf 91.8% ±0.25mm bei der Sandform 3p und noch 80.9% bei der Sandform Offset. Diese Differenz wird allerdings nicht einer ungenaueren Formabbildung der Offsetformen zugeschrieben, sondern der unschärferen Ausrichtung der Offset Seiten. Im Ergebnis gestaltet sich die Positionierung mithilfe der Referenzpixel einfacher und exakter. Grundsätzlich ist von einer gleichartigen Übertragungsgenauigkeit für beide Seiten auszugehen und hierbei der bessere Wert 91.8% anzunehmen.

Die Übertragungsgenauigkeit ist somit nach aktuellem Stand nicht als Faktor für die auftretenden Abweichungen zu sehen und braucht in den weiteren Betrachtungen und Analysen nicht berücksichtigt zu werden.

#### Die Wandstärke

Die im Rahmen dieser Arbeit häufig verwendete prozentuale Aufteilung der Abweichungen, ist bei der Ermittlung der Wandstärke mit der verwendeten Software Geomagic Control nicht möglich und ein derartiger Vergleich daher nicht anzustellen. Auch eine automatisierte Ermittlung der Extremwerte ist nicht möglich. Die folgenden Angaben sind daher qualitative Einschätzungen.

Die Wandstärke bewegt sich bei den Bauteilen zwischen 48.00mm und 52.00mm. Die negativen Abweichungen dominieren das Erscheinungsbild. Für alle Bauteile charakteristisch sind die positiven Abweichungen im Bereich der Referenzpixel (P1) und in den Randbereichen (P2). Im Bereich zwischen den drei Referenzpixeln (N1) sind sich die Abweichungen fast ausschließlich negativ und die Bauteilstärke geringer als 50mm (4.5-29). Diese Beobachtung deckt sich mit der Analyse, der zur Fertigung genutzt Elastomermatten.

Die Wandstärke der Bauteile hängt von zwei Faktoren ab. Zum einen der Formgenauigkeit der verwendeten Sandschalungen und zum anderen der Ausrichtungsgenauigkeit dieser beiden zueinander. Der Minimalabstand der beiden Sandschalungen wird über in der Sandschalung verschraubten Distanzhalter gewährleistet und auf die gewünschten 50mm eingestellt (Abb. 4.5-30 bis -32). Der Maximalabstand wird über das in der Einleitung des Kapitels beschriebene sensorische System überwacht. Somit wirkt sich der Zusammenbau der Schalung nivellierend auf den Randbereich aus. Diese Art der Ausrichtung kann als sehr zuverlässig angesehen werden und hat nach derzeitigem Erkenntnisstand keine neuen, relevanten Abweichungen zur Folge. Es ist zu erwarten, dass sich das Abweichungsbild der betonierten Bauteile dementsprechend verhält.

Sollen die Abweichungen genauer quantifiziert werden, müsste ein neuer Abgleich erfolgen. Dieser wird wie folgt vorgeschlagen:

Die beiden digital erfassten Sandschalungen eines Bauteils werden, anhand der neun real platzierten Abstandhalter, zueinander ausgerichtet. Über den fixierten Abstand der zueinander ausgerichteten digitalen Originalgeometrien entsteht eine Referenz. Die erste Seite des betonierten Schalenelements wird noch auf der unteren Sandform liegend erfasst, kann dann abgenommen werden um dann die zweite Seite erfassen zu können. Durch eine Überlagerung der Kanten entsteht das digitale Testobjekt der Schale, das nun durch Überlagerung mit der vorher erstellten Referenz abgeglichen werden kann.

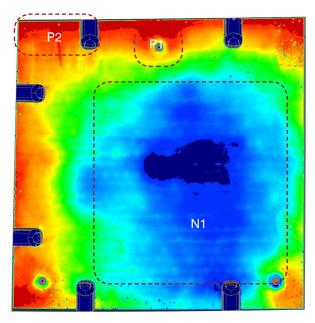
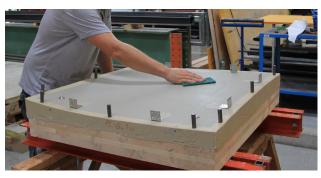


Abb. 4.5-29: Charakteristisches Abweichungsbild der Wandstärke am Beispiel Schalenelement 2





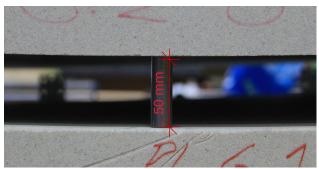


Abb. 4.2-30- 32: Die neun aufgeschraubten Distanzbolzen definieren den Abstand der Sandschalung auf 50mm im Randbereich

#### Betonierrichtung

Der Wandstärkenvergleich der Schalenelemente 1-9 (Abb. 4.5-33) zeigt, dass die Überprüfung der Schalung während des Betoniervorgangs erfolgreich war. Die auftretenden Abweichungen haben sich deutlich reduziert. Die grundsätzliche Tendenz ist kaum noch erkennbar und bewegt sich im Rahmen von <±0.25mm.

Wirkungsweisen der beiden Ausrichtungsmethoden 3p und Best-Fit

Grundsätzlich ist zu beachten, dass die beiden angewendeten Methoden, 3p Ausrichtung und Best-Fit, nur verschieden Betrachtungsweisen des gleichen Objektes darstellen. Es wird nur ein unterschiedlicher Bezug gesetzt. Die hat allerdings gravierende Unterschiede in der Darstellung zur Folge, welche hier noch einmal erklärt werden.

Die Best-Fit Methode richtet zwei Objekte zueinander aus und sucht dafür größtmögliche Korrespondenzen, die in iterativen Ausrichtungsschritte zu einer Überlagerung führen. Dabei erstellt das Programm eine große Anordnung von Punkten auf beiden Objekten (siehe Kapitel 4.1) und legt diese genauest möglich übereinander. Dabei werden die Abstände der Objekte zueinander ausgemittelt. Sie zeigt somit die bestmögliche Einpassung mit den geringsten Toleranzen.

Sichtbar wird dies an der Abbildung 4.5-34. Zwei kreisbogenförmige Elemente werden miteinander verglichen. Nach der Best-Fit Ausrichtung liegt das kleinere Element 1 (gestrichelt) in Element 2 (durchgezogen). Die Überstände (rot dargestellt) sind an allen Punkten gleich groß.

Die 3p Ausrichtung referenziert auf eine festgelegte Punktfolge, in diesem Fall die drei Referenzpixel. Diese bilden quasi den Nullpunkt der Messungen. Alle Werte beziehen sich zu dem so ausgerichteten Objekt. Werden die gleichen Objekte nun über diese drei Punkte ausgerichtet die, wie bei den hergestellten Schalenelementen, alle auf einer Seite liegen, zeigen sich auf dieser Seite so gut wie keine Abweichungen mehr. Sie summieren sich auf der Oberseite auf.

#### Relation zur Einstellung der Referenzpixel

Weiteres ist zu beachten, dass die drei Referenzpixel idealerweise fixiert sein sollten, aber systembedingt Teil des Einstellungsprozesses waren. Sie unterliegen somit den gleichen Toleranzen der Einstellung wie alle anderen Pixel auch ( $<\pm0.25$ mm). Da sie hier aber die Referenz der Ausrichtung darstellen, wirkt sich die Abweichung der Einstellung auf die Ausrichtung des Objektes aus. Es ist davon auszugehen, dass dieses "Kippen" bei allen Objekten mehr oder wenige stark auftritt.

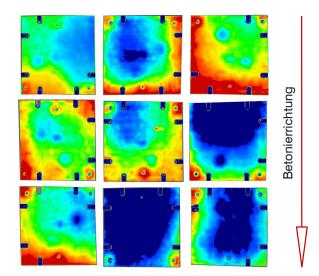


Abb. 4.5-33: Schalenelemente 1-9 in Betonierrichtung orientiert

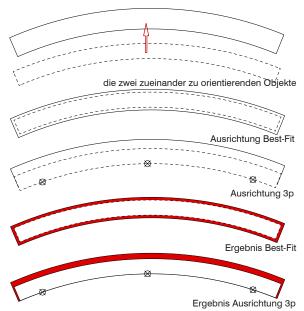


Abb. 4.5-34: Unterschiedliche Wirkungsweisen der Ausrichtungsmethoden 3p und Best-Fit

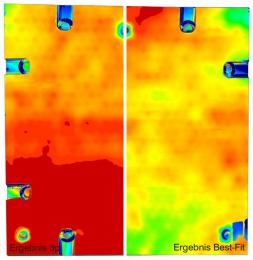


Abb. 4.5-35: Sichtbares Kippen des Bauteils 3 bei der 3p Ausrichtung, homogeneres Bild mittels Best-Fit

#### Die Formgenauigkeit der Bauteile

Die ersten Analysen von Abformgenauigkeit und Wandstärke zeigen, dass bei dem Arbeitsschritt der Betonage keine relevante Zunahme der Abweichungen zu erwarten ist. Im Ergebnis zeigt sich eine direkte Übertragung der lokalen Abweichungen der Sandformen, auf das Betonbauteil. Diese wird am deutlichsten bei einem optischen Vergleich in Form einer Überlagerung von Sandschalung und Bauteil sichtbar (Abb. 4.5-36 und -37). Leicht versetzt zeigen sich die gleichen Abweichungen auf den Sandschalungen wie auf den Betonbauteilen. Dieser Vergleich stellt in gewisser Weise eine Inversion der Messung der Übertragungsgenauigkeit dar und wird daher nur exemplarisch am Bauteil 9 demonstriert.

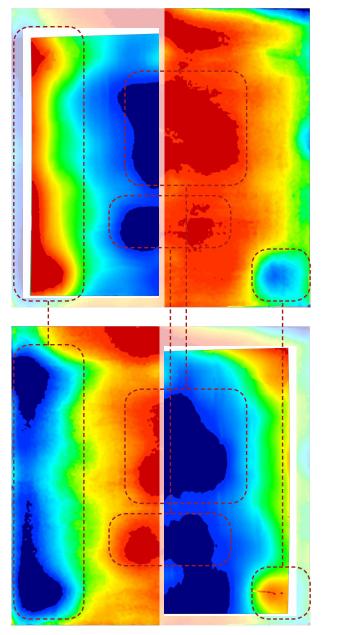


Abb. 4.5-36: Überlagerung von Formsandschalung und fertigem Betonbauteil 9, Seite Offset

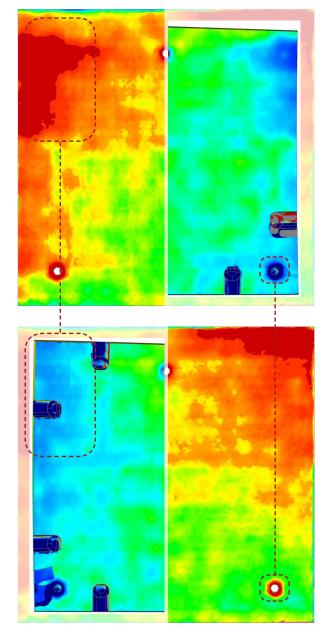


Abb. 4.5-37: Überlagerung von Formsandschalung und fertigem Betonbauteil 9, Seite 3p

#### Abweichungen 3p Ausrichtung

Die Ausrichtungsmethode die grundsätzlich anzustreben ist, da sie Orientierungen von Abweichungen sichtbar macht, ist auch hier wieder die 3p Ausrichtung. Die Abweichungen variieren hier systemimmanent deutlich stärker, von Bauteil zu Bauteil, als die Best-Fit Ausrichtung. Im Durchschnitt unterschreiten 26.2% der gemessenen Abweichungen, die untere kritischen Toleranz von >-1.00mm, 14.0% liegen innerhalb der nominellen Toleranz von ±0.25mm und 19.0% überschreiten den oberen kritischen Toleranzbereich von >+1.00mm. Diese manifestiert sich in der Regel in Form eines Kippens des gesamten Bauteils (siehe z.B. Schalenelement 7 und 8). Ungenauigkeiten der bei der Erstellung der Referenzpixel haben massive Auswirkungen auf den Gesamteindruck und können diesen stark verfälschen, weshalb zusätzlich immer eine Best-Fit Ausrichtung gegenübergestellt wurde.

#### Abweichungen Best-Fit Ausrichtung

**Durchschnitt** 

**Abweichungen Best-Fit Ausrichtung** 

Die Ausmittelung der Test- und Referenzobjekte verschleiert die Auswirkungen von Abweichungen im Totalen, verdeutlicht diese dafür im Lokalen (siehe Vergleich 3p zu Best-Fit Schalenelement 6). Im Durchschnitt unterschreiten 9.09% der gemessenen Abweichungen die untere kritischen Toleranz von -1.00mm, 36.0% liegen innerhalb der nominellen Toleranz von ±0.25mm und 6.76% überschreiten den oberen kritischen Toleranzbereich von >+1.00mm.

in %

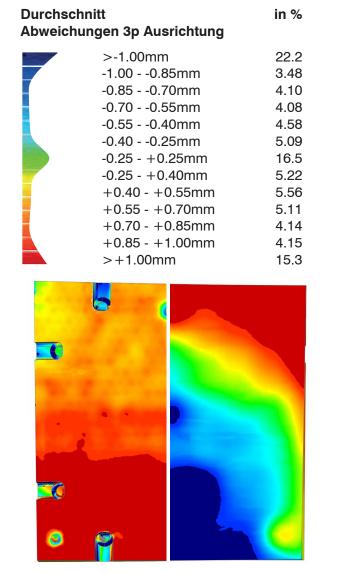


Abb. 4.5-38: Seite 3p (inks) und Offset (rechts) des Bauteils 3 zur Illustration der vedrehten Abweichung

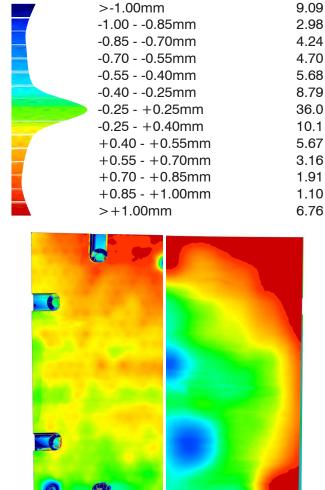


Abb. 4.5-39: Seite 3p (inks) und Offset (rechts) des Bauteils 3 zur Illustration der vedrehten Abweichung



### 4. Ergebnisse und Auswertungen

### 4.6 Die Kontaktflächen

#### Messprozeduren, Datenerfassung und Auswertung

#### Einleitung

Das folgende Kapitel behandelt die Bearbeitung und Messung der Kontaktflächen. Dazu wird kurz auf das Verbindungsystem eingegangen, und wie es die Anforderungen beeinflusst. Der zweite Teil erläutert die Fertigung im Hinblick auf die geforderte Genauigkeit, die auftretenden Ungenauigkeiten und Unschärfen, bevor die Ergebnisse im Hauptteil präsentiert und analysiert werden.

#### Das Verbindungssystem

Das Konzept zum Aufbau des Systems basiert auf der Anwendung einer trockenen Fuge (vgl. Kapitel 2.3). Dies ermöglicht eine lösbare Verbindung der Bauteile und somit einen einfachen Aufbeziehungsweise Rückbau des Objektes.

Orthogonal zur Sichtfläche verlaufende Stirnseiten werden stumpf gestoßen und mittels eines im Projekt entwickelten und berechneten mechanischen Spannschloss-Verbindungssystems verschraubt. Dazu werden U-förmig gebogene Rundstähle im Bereich der Ränder in der Schalung fixiert und miteinbetoniert. Diese Rundstähle liegen von Platte zu Platte gegenüber und werden mittels des Spannschloss-Verbinders (dieser ist in Ausführung und Wirkungsweise mit einem Arbeitsplattenverbinder vergleichbar) in der geforderten Position verspannt. Durch das aufgebrachte Drehmoment dieser Verschraubung erfolgt eine Vorspannung, welche die Fuge "überdrückt" und somit die auftretenden Biegemomente vom Querschnitt aufgenommen werden können.

Allerdings bedingt die gewählte Verbindung eine im Vergleich zu der Formgenauigkeit der Sichtflächen noch einmal erhöhte Sorgfalt und eine maximale Fertigungsgenauigkeit, da sich hier Abweichungen auf die benachbarten Bauteile übertragen und somit aufsummieren können.

#### Formatieren der Bauteile mittels Nassschleifen

Ziel der finalen Bearbeitung ist also die möglichst genaue Herstellung der Kontaktfläche der Schalenelemente mittels Nassschleifen. Die im RDL-Labor installierte Roboteranlage wurde speziell für präzise Nassbearbeitungsschritte konzipiert und bietet daher eine gute Plattform für eine so genaue Nassbearbeitung. Die zur Bearbeitung eingesetzten Werkzeuge sind eigens entwickelte Diamantschleifstifte mi folgender Konfiguration:

- 3 STK Diamantschleifstift, Körnung D 427 40 m/s D=40 T=80 L1=140 S=20 H7 NNUT=5 W= $\sim$ 2 galvanisch wiederbelegt
- 2 STK Diamantschleifstift, Körnung D 602 40 m/s D=40 T=80 L1=140 S=20 H7 NNUT=5 W=~



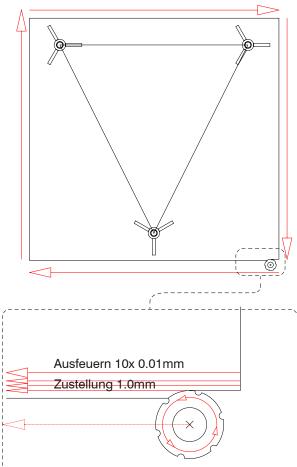


Abb. 4.6-1: Werkzeugbahn total und im Detail (Zustellung zur Abnahme und Ausfeuern)



Abb. 4.6-2: Abgenutzter Schleifstift (Detailaufnahme)

# Einflussfaktoren auf die Bearbeitungsgenauigkeit

#### Werkzeugbahn

Die Schalenelemente wurden mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 800mm/min und einer Drehzahl von 7200 U/min bearbeitet. Die Zustellung betrug 1.0mm pro Schleifvorgang. Das Schleifen der Kontaktfläche erfolgte immer gegenläufig (die Rotationsrichtung des Schleifkörpers läuft entgegengesetzt der Vorschubrichtung). Jede Kontaktfläche wurde abschließend noch mittels einer Zustellung von 10x 0.01 mm ausgefeuert (Abb. 4.6-1).

#### Werkzeugverschleiß

Das verwendete Werkzeug, ein diamantbesetzter zylindrischer Schleifkörper, der entlang der Kontaktfläche geführt wird, wurde nach der Bearbeitung mehrfach getauscht, da aufgrund des Werkzeugverschleißes die Standzeit erreicht worden war (Abb. 4.6-2).

Das Weg- und Ausbrechen der Diamanten auf der Schleifoberfläche ist ein dem Schleifprozess immanenter Vorgang. In Folge dessen reduziert sich der Werkzeugdurchmesser von der Erstbenutzung bis zum Tausch um ca. 0.50 mm (vgl. S. 130 - 131). Der Abtrag des Diamantkorns ist stark von der Faserverteilung abhängig und daher nicht konstant. Eine Flanke mit höherem Faseranteil oder auch einer ungünstigen Ausrichtung (z.B. parallel zur Vorschubsichtung) führt auch zu einem erhöhten Verschleiß. Ein abgenutztes Werkzeug kann somit für ein Übermaß des Bauteiles nach Bearbeitung verantwortlich sein.

#### Aufspannung (Abb. 4.6-3)

Die Aufnahme der Schalenelemente erfolgt über drei auf dem Aufspanntisch fixierte Aufspannbolzen. Diese wurden geometrisch so ausgeführt, eingemessen und positioniert, dass sie genau in die über die Referenzpixel des Pixeltisches eingeprägten Aussparungen passen. Daher ist die Fertigungsgenauigkeit und in diesem Zusammenhang die Auflagegenauigkeit der Platte auf der Aufspannvorrichtung wichtig.

Hierbei ist zu beachten, dass auch bei ungenauer Position nach wie vor alle Kontaktflächen bearbeitet werden. Das Übermaß der Platten ist, mit teilweise über 10mm, im Verhältnis relativ groß. Eine absolute Maßänderung der Platte nach Fertigung ist daher nicht mit der Aufspannung in Zusammenhang zu stellen. Die Variable ist die relative Position der Fertigung, infolge verschiebt sich die Kontaktfläche im Raum und der Anschluss zum folgenden Bauteil wird erschwert.

#### Ausrichtung der Platten zum Roboter

Die Ausrichtung des Bauteils relativ zum Roboter steht auch im Zusammenhang zur Fertigungsgenauigkeit. Der ABB-IRB 6660 ist von seiner Konstruktion auf maximale Steifigkeit ausgelegt. Dennoch ist bei anwachsendem Abstand des Bearbeitungswerkzeugs also bei einem größeren Hebelarm eine erhöhte Abweichung in Form eines anwachsenden Übermaßes möglich. (Abb. 4.6-4).

### **Messung und Auswertung**

#### Die Messung

Die Messung der Kontaktflächen erfolgte im Rahmen der Messung der Bauteile wieder visuell. Die Schalenelemente liegend in zwei Schritten die Vorder-und die Rückseite gemessen (siehe Kapitel 4.5: Die Sichtflächen). Zur Analyse wird hier der Scan der Seite 3p., also der Unterseite mit den drei Referenzkegeln verwendet. Ausnahmen bilden das Schalenelement 5 und 6. bei denen während des Messverfahrens nicht alle 4 Kontaktflächen in einem Scan erfasst wurden. Hier wird das zusammengesetzte Gesamtmodell vermessen. Da es beim Zusammensetzten von den beiden Scanbildern zu Überschneidungen und somit Aufdoppelungen der Kontaktflächen kommt, ist hier von einer leicht höheren Unschärfe in Form eines größeren Materialüberstandes auszugehen.

Zum größeren Verständnis der Messergebnisse erfolgten Ausrichtung und Abgleich sowohl über Best-Fit und über die vier auf der Seite 3p befindlichen Eckpunkte (4p Ausrichtung) und die Referenzpixel (3p Ausrichtung).

#### **Anmerkungspunkte**

Um ein genaueres Bild über den Verlauf der Abweichungen zu haben und diese im Verhältnis einer relativen Verdrehung des Objektes zu kontextualisieren, wurden in den Eckbereichen einer jeden Kontaktfläche Anmerkungspunkte erzeugt, welche eine genaue Angabe über die Abweichungen an diesen Punkten treffen. Damit diese Punkte aber nicht unbeabsichtigt einen Extremwert, z.B. durch das Auftreten von Lunkern ermitteln, wird um den gewählten Punkt ein Kreis mit einem Radius von 2.5 mm erzeugt, der Abweichungsradius. Innerhalb dieses Kreises werden in einer zufälligen Verteilung 50 Punkte platziert. Aus diesen Punkten erfolgt die Berech-



Abb. 4.6-3: Aufspannung eines Schalenelementes

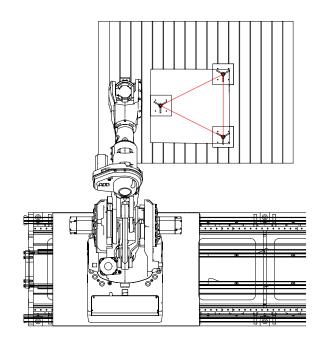


Abb. 4.6-4: Ausrichtung der Aufspannung zum Roboter

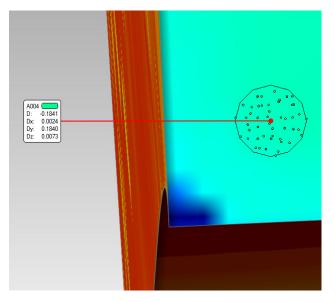


Abb. 4.6-5: 50 Messpunkte zufällig in einem Radius von 2.5mm verteilt erzeugen den Anmerkungspunkt

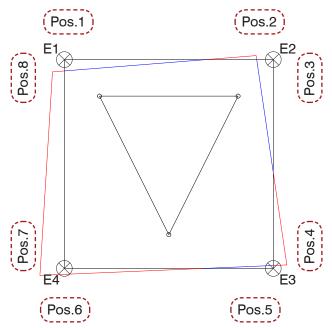
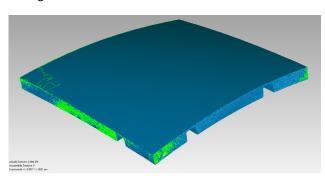
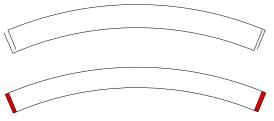


Abb. 4.6-6: Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen





Abweichungen zweier überlagerter Platten summieren sich beidseitig auf (rot markiert)

nung eines Mittelwerts, der für die Beurteilung maßgeblich ist (Abb. 4.6-5).

Des Weiteren wurden über diese Punkte eventuelle Abweichungen in Form eines Kippens des Schleifstifts auf Grund des Schnittdrucks untersucht.

#### Charakterisierende Darstellung

Um die Bewertung der erfassten Abweichungen der Kontaktflächen zu unterstützen, wurde eine charakterisierende Darstellungsmethodik gewählt. Anhand eines der Baugröße der Schalenelemente entsprechenden quadratischen Dummies, werden die Abweichungen, die real im Bereich weniger 1/10 Millimeter liegen 100-fach überhöht dargestellt und somit die Tendenzen pointiert dargestellt (Abb. 4.6-6).

#### Abweichungen zusammengesetzter Scans

Die Ausrichtung und Auswertung der Bauteile 5 und 6 konnte aufgrund des Aufnahmeprozesses erst mit dem aus den beiden Scans der Oberund Unterseite zusammengesetzten Modell erfolgen (Abb. 4.6-7 und 8). Um eine Einschätzung für ein eventuell aus den Überlappungen resultierende Übermaß zu gewinnen, wurden die Schalenelemente 1-3 in ihren Auswertungen jeweils mit dem über die 3p-Seite über die vier Eckpunkte ausgerichtet dem zusammengesetzten Modell / der 8p Ausrichtung gegenübergestellt (siehe Anhang Auswertung).

Von 12 gemessenen Seitenlängen zeigte sich überhaupt nur bei vieren ein höheres Maß bei den zusammengesetzten Modellen. Die Position 4-7 des Bauteils 3 zeigt hier die größte Abweichung mit +0.18mm. Dem gegenüber steht eine Abweichung des Bauteils 2 an den Positionen 3-8. Dort wird eine Abweichung von -0.19mm verzeichnet. Eine relevante Verfälschung der Maße durch Überlappung der Bauteile beim Zusammensetzen der Scans ist also nicht zu beobachten.

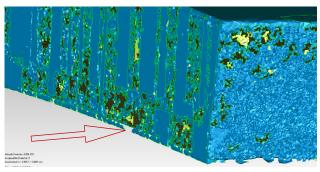


Abb. 4.6-7 Sichtbare Abweichungen durch Überlagerung zweier Kontaktflächen der beiden Scans

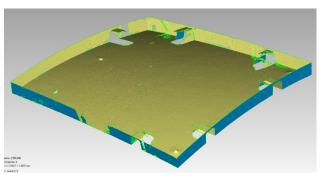


Abb. 4.6-8: Messmodell Seite 3p (alle Kontaktflächen in einem Scan erfasst)

Abweichungen 3p und 4p/8p-Ausrichtungen

Wie schon beschrieben, ist die Ausrichtungsgenauigkeit über die verschiedenen Verfahren von zentraler Bedeutung für eine referenzierbare Aussage zur Fertigungsgenauigkeit. Da die Ausrichtung händisch entweder an den 3 Referenzpunkten oder den Eckpunkten erfolgt, gibt es eine Abweichung von unbekannter Größe zur exakten Überlagerung.

Daher wird in einer kurzen Testserie die Wiederholungsgenauigkeit der Ausrichtungsmethoden 3p und 4p überprüft. Dazu werden die digitalen Modelle mit dem gleichen Verfahren wiederholt ausgerichtet und die Ergebnisse untereinander verglichen (siehe Appendix).

Die Auswertung ergab eine maximale Abweichung von  $\pm 0.17$ mm der 3p Methode (Abb. 4.6-9 und -10) und bei der 4p Methode von  $\pm 0.31$ mm (Abb. 4.6-11 und -12). Die Wiederhohlgenauigkeit der 3p Ausrichtung wird somit mit  $<\pm 0.20$ mm angenommen, die der 4p-Ausrichtung mit  $<\pm 0.35$ mm (siehe Appendix).

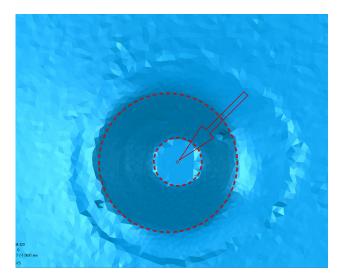


Abb. 4.6-9: Abweichungen der 3p Ausrichtung im Maßstab 2:1 vergrößert (Unschärfe mit Pfeil markiert)

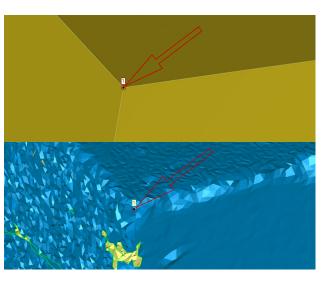


Abb. 4.6-11: Abweichungen der 4p-Ausrichtung im Maßstab 2:1 vergrößert (Unschärfe mit Pfeil markiert)

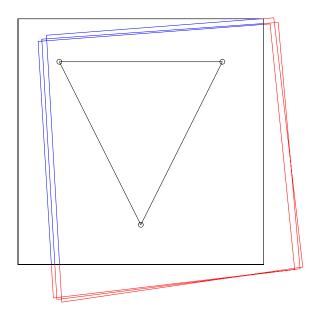


Abb. 4.6-10: Charakterisierende Überlagerung der Abweichungen bei der 3p Ausrichtung

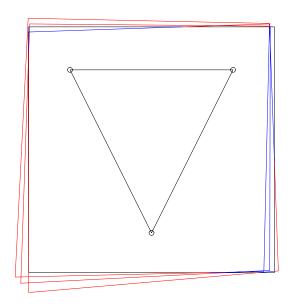


Abb. 4.6-12: Charakterisierende Überlagerung der Abweichungen bei der 4p-Ausrichtung

### Verschleiß Schleifstifte

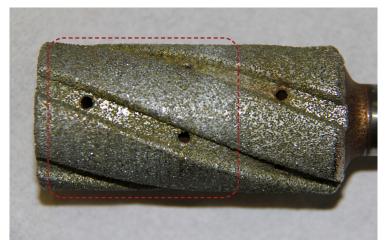


Abb. 4.6-13: Schleifstift 01

### Schleifstift 01 (Standzeit erreicht)

Durchmesser zu Beginn: ∼41.40mm

Durchmesser bei Ende: ~40.90mm

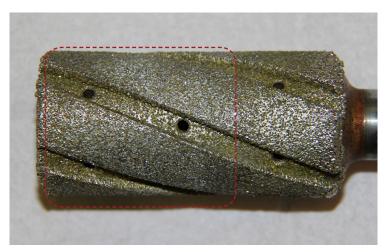


Abb. 4.6-14: Schleifstift 02

# Schleifstift 02 (Standzeit erreicht)

Durchmesser zu Beginn: ∼41.50mm

Durchmesser bei Ende: ∼40.85mm

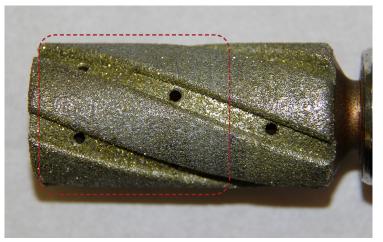


Abb. 4.6-15: Schleifstift 05

### Schleifstift 03(verwendet)

Durchmesser zu Beginn: ~40.80mm

Durchmesser bei Ende: ∼40.60mm

### Vermessung der genutzten Schleifstifte

Die Vermessung des Werkzeugradius der Schleifstifte ist mittels eines Messschiebers erfolgt. Sie erfüllt daher nicht die Ansprüche einer vollwertigen Messung in Form von Messschnitten, zeigt aber dennoch den deutlichen Abtrag des Schleifkorns und deutet auf einen Zusammenhang zwischen Werkzeugabtrag und einem Übermaß der Schalenelemente hin.

#### Messungen der Kontaktflächen

Auf den folgenden Seiten werden die Messergebnisse der Sichtflächen auszugsweise präsentiert. Folgende Messungen werden dargestellt:

- Kontaktflächen Referenzelement 1 (6p Ausrichtung)
- Kontaktflächen Referenzelement 2 (6p Ausrichtung)
- Kontaktflächen Schalenelement 1 (3p Ausrichtung)
- Kontaktflächen Schalenelement 1 (4p-Ausrichtung)
- Kontaktflächen Schalenelement 5 (3p Ausrichtung)
- Kontaktflächen Schalenelement 5 (4p-Ausrichtung)

Alle weiteren Messungen können im Appendix nachgeschlagen werden.

# Kontaktflächen Referenzelement 1 6p-Ausrichtung

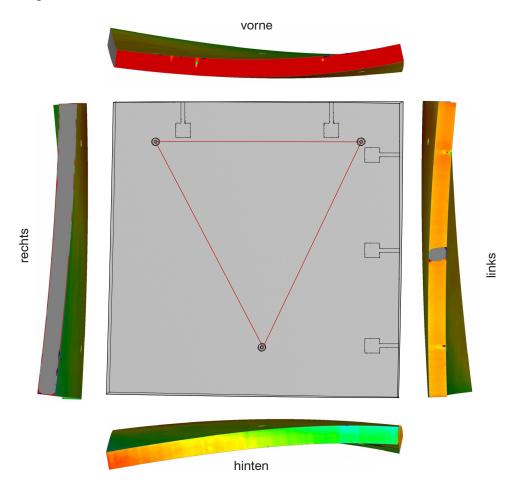


Abb. 4.6-16: Ausrichtung der Abweichungen

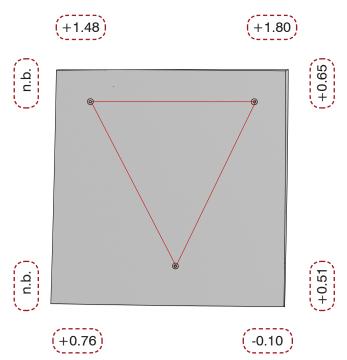


Abb. 4.6-17: Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

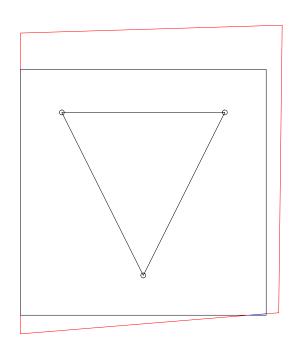


Abb. 4.6-18: Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

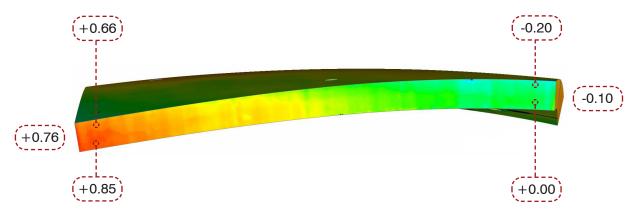
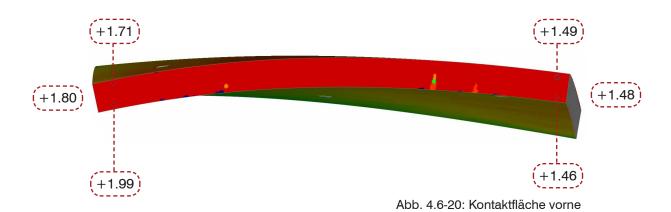


Abb. 4.6-19: Kontaktfläche hinten



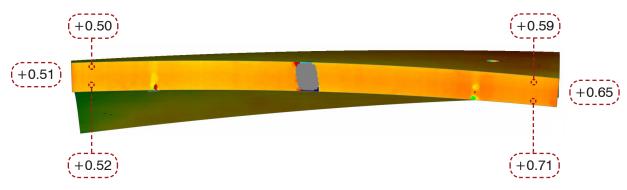


Abb. 4.6-21: Kontaktfläche 1 rechts

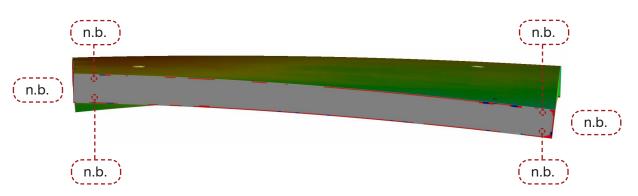


Abb. 4.6-22: Kontaktfläche rechts

# Kontaktflächen Referenzelement 2 6p-Ausrichtung

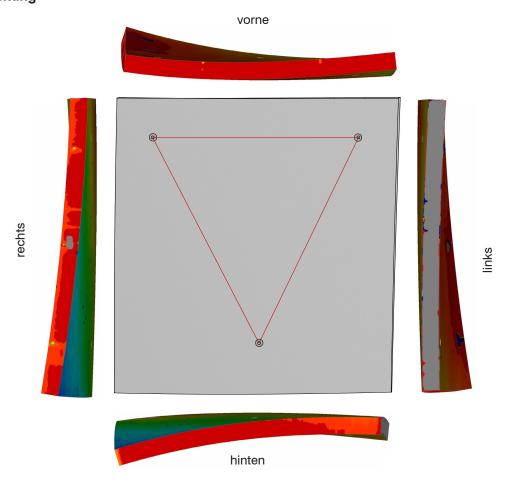


Abb. 4.6-23: Ausrichtung der Abweichungen

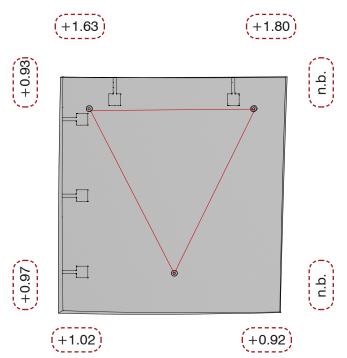


Abb. 4.6-24: Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

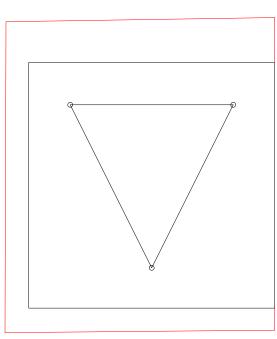


Abb. 4.6-25: Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

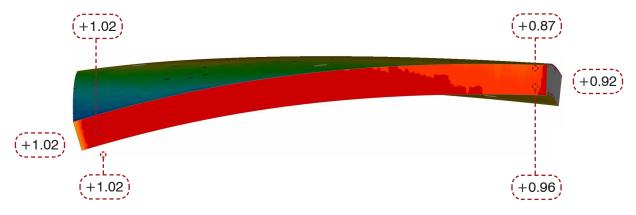


Abb. 4.6-26: Kontaktfläche hinten

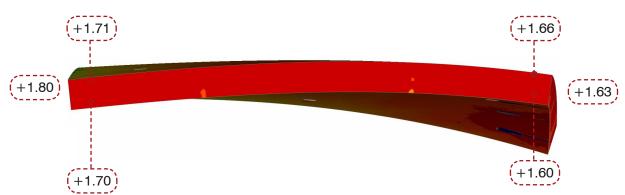


Abb. 4.6-27: Kontaktfläche vorne

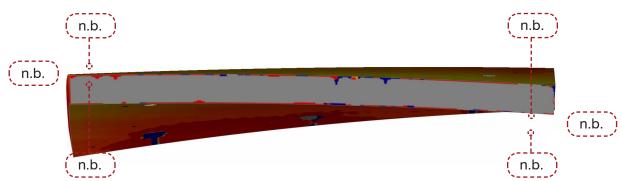


Abb. 4.6-28: Kontaktfläche links

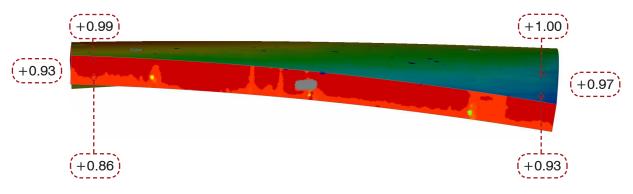


Abb. 4.6-29: Kontaktfläche rechts

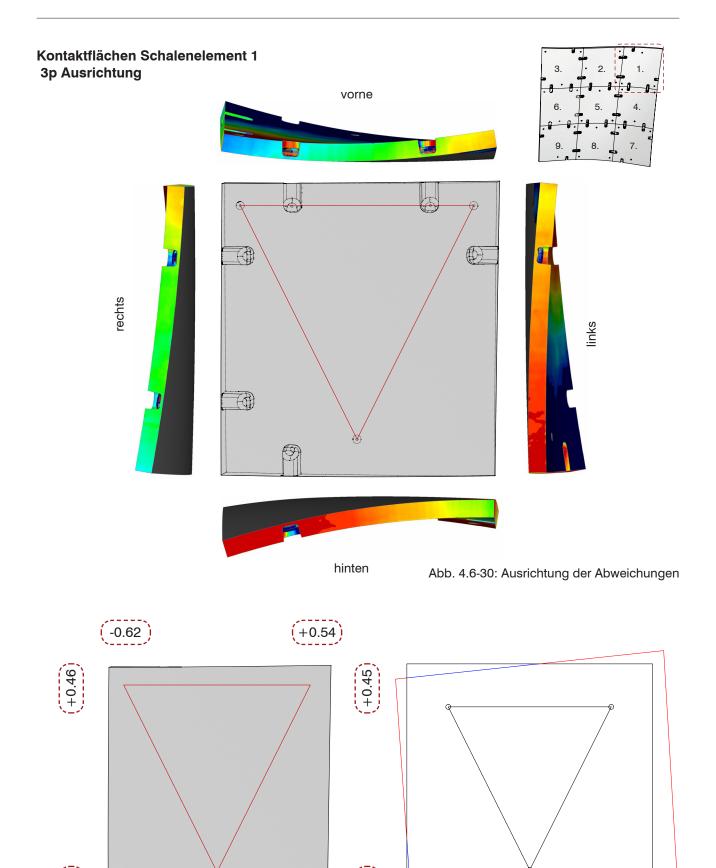


Abb. 4.6-31: Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

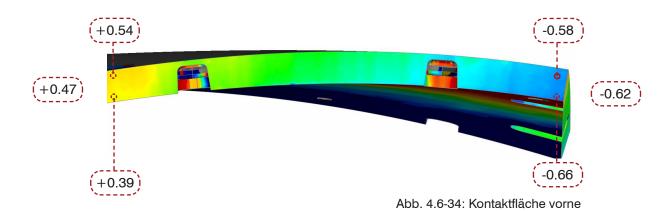
(+1.42)

Abb. 4.6-32: Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

(+0.07)



Abb. 4.6-33: Kontaktfläche hinten



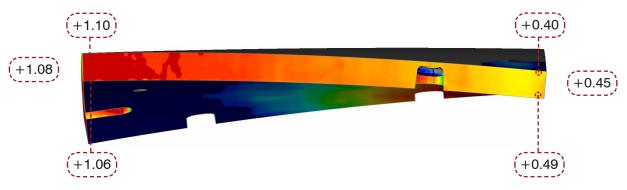


Abb. 4.6-35: Kontaktfläche links

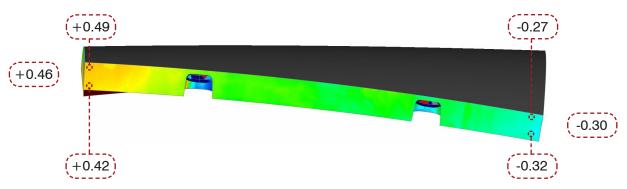


Abb. 4.6-36: Kontaktfläche rechts

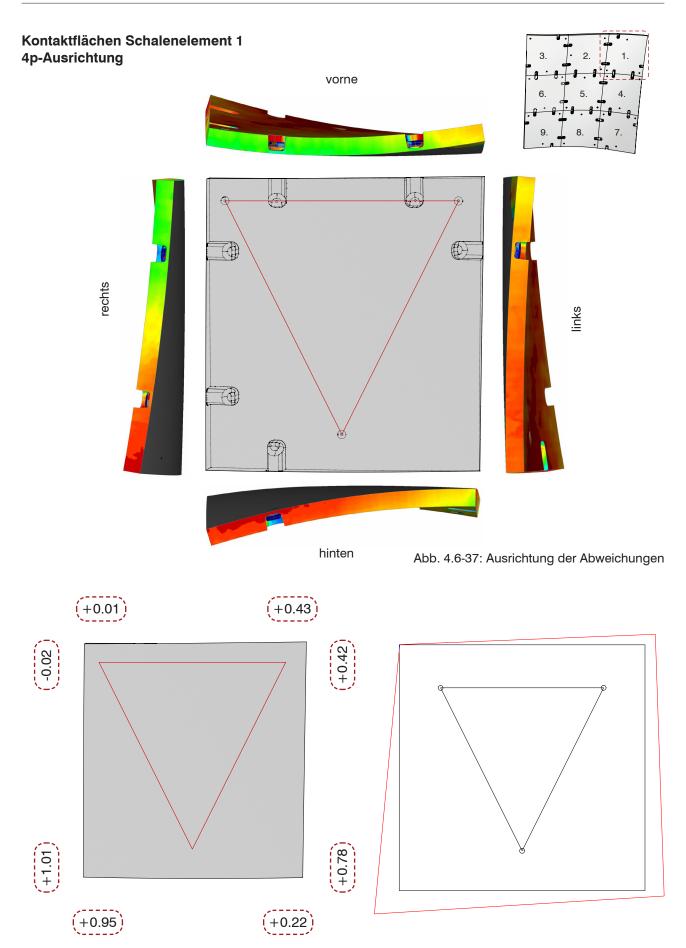


Abb. 4.6-38: Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

Abb. 4.6-39: Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen



Abb. 4.6-40: Kontaktfläche hinten

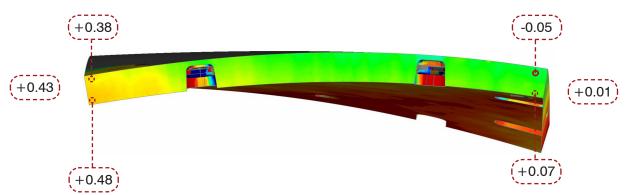


Abb. 4.6-41: Kontaktfläche vorne



Abb. 4.6-42: Kontaktfläche links

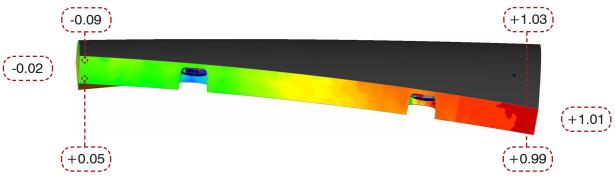


Abb. 4.6-43: Kontaktfläche rechts

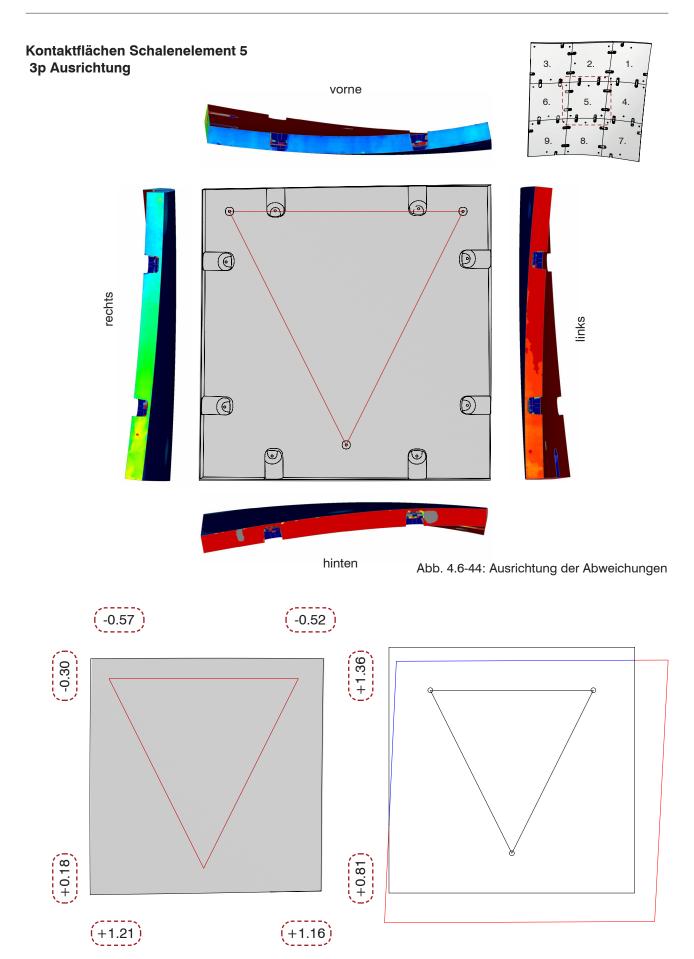


Abb. 4.6-45: Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

Abb. 4.6-46: Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

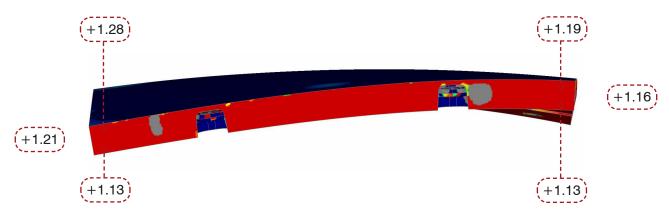
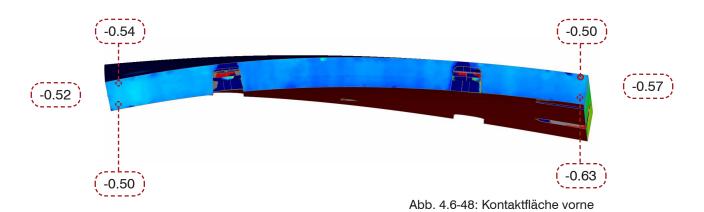


Abb. 4.6-47: Kontaktfläche hinten



+1.28 +0.81 (+0.81)(+1.36)(+0.81) +1.37

-0.26 +0.21

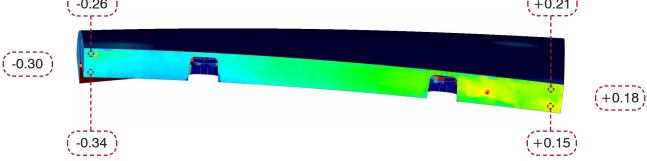


Abb. 4.6-50: Kontaktfläche rechts

Abb. 4.6-49: Kontaktfläche links

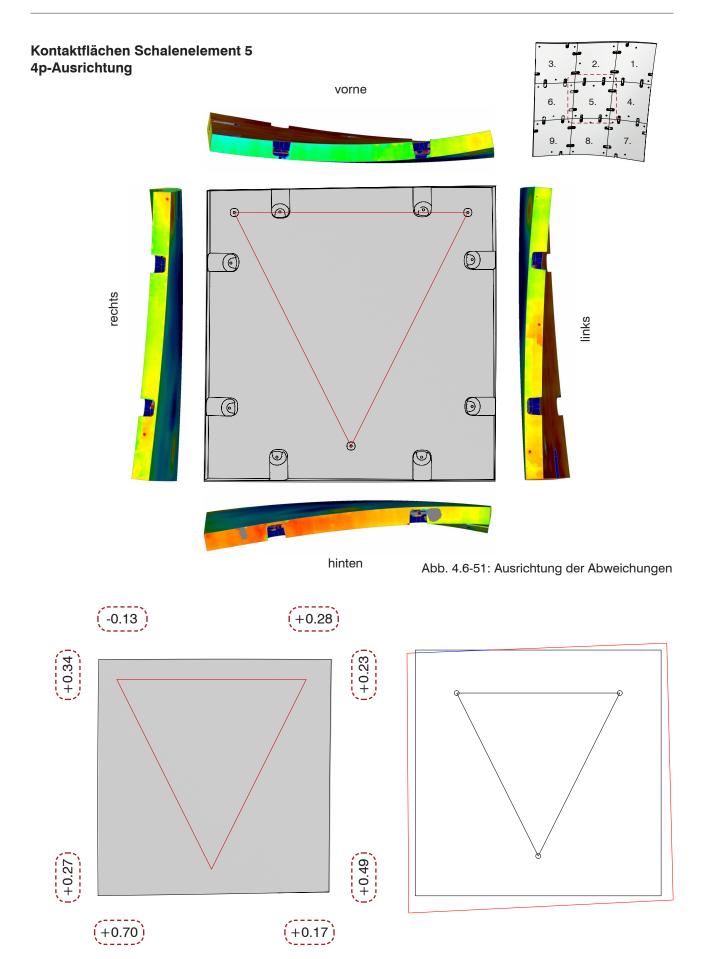
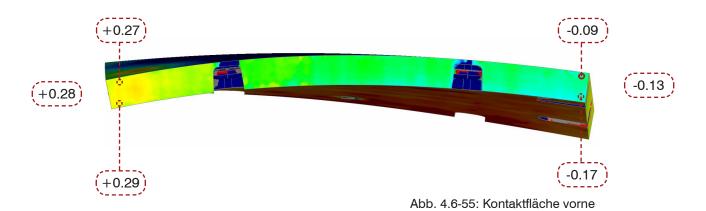


Abb. 4.6-52: Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

Abb. 4.6-53: Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen



Abb. 4.6-54: Kontaktfläche hinten



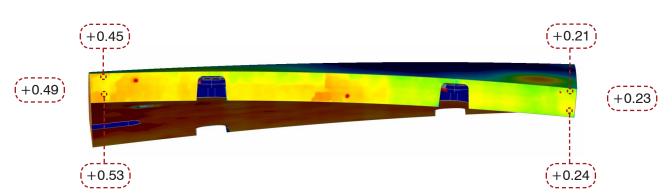


Abb. 4.6-56: Kontaktfläche links

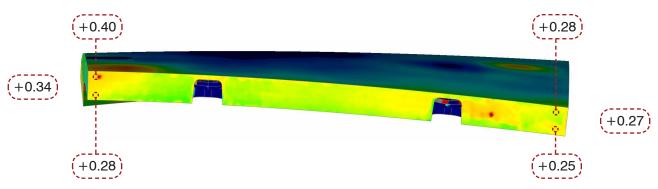


Abb. 4.6-57: Kontaktfläche rechts

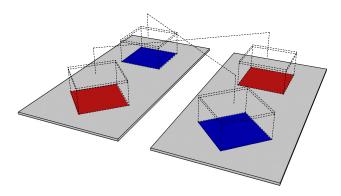


Abb. 4.6-58: Ein Ausschneiden und rotiertes Einsetzten des im Grundriss quadratischen Bauteils bleibt bei einem planen Objekt ohne Auswirkung, die Elemente passen deckungsgleich in die Aussparung

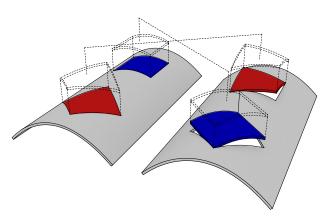


Abb. 4.6-59: Anders bei einem gekrümmten Objekt, hier zeigen sich deutliche Lücken in der 3. Dimension

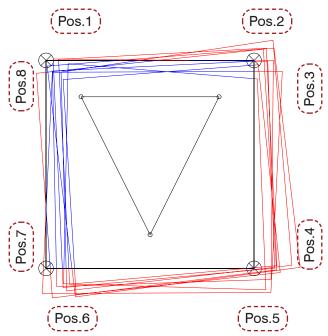


Abb. 4.6-60: Überlagerung der Abweichungen aller neun Kontaktflächen nach 3p Ausrichtung

### Messergebnisse und Auswertung

Wirkungsweise 3p/4p Ausrichtung

Wie schon in Kapitel 4.5 wird auch hier noch einmal die unterschiedliche Wirkungsweise der Ausrichtungsmethoden beleuchtet.

Ähnlich der Best-Fit Ausrichtung, ist die Ausrichtung über die vier Eckpunkte diejenige, bei der die auftretenden Abweichungen in Relation geringer sind und augenscheinlich die besseren Ergebnisse liefert.

Da die 3p Ausrichtung, also die Ausrichtung über die drei Referenzpixel der tatsächlichen Ausrichtung bei der Aufspannung der Bauteile zum Formatschleifen entspricht, ist sie die maßgebende Methode zur Analyse der auftretenden Abweichungen in der Fertigung. Sie dokumentiert daher die während des Schleifvorgangs tatsächlich fabrizierten Abweichungen.

So wurde über diese Methode und die charakterisierende Darstellung die nach der zeitigem Kenntnisstand vorhandene Verdrehung der Aufspannung 0.05-0.10° gegen den Uhrzeigersinn entdeckt (S. 147 "Rotation").

Allerdings ist zu beachten, dass sich diese Abweichungen nicht automatisch in der gleichen Form beim zusammengebauten Objekt, beispielsweise im Mock-Up, wiederfinden.

Die ermittelte Rotation illustriert diesen Effekt. Wie in den Abbildungen 4.6-58 und -59 dargestellt wirkt sich die Rotation eines Objektes um die Z-Achse erst in der dritten Dimension aus. Die beiden Quadrate in der Grafik sind in ihren Dimensionen ident und unterscheiden sich nur in ihrer Orientierung auf der Fläche. Das rotierte Quadrat passt exakt in das gerichtete und umgekehrt. Wölbt sich diese Fläche wie dargestellt beispielsweise zu einem Tonnengewölbe, werden die Abweichungen sichtbar. Die Bauteile können nicht mehr fehlerfrei getauscht werden, und je größer die Krümmung desto größer wird der Fehler. In der Folge bleibt die registrierte Rotation aufgrund der geringen Bauteilkrümmung der Schalenelemente ohne merkliche geometrische Auswirkung auf das Gesamtmodell (siehe Kapitel 4.7).

Zu den charakterisierenden Darstellungen

Ein Vergleich selbstähnlicher aber geometrisch immer unterschiedlicher Bauteile birgt grundsätzlich ein erhöhtes Risiko von Fehlinterpretationen. Gleichartig wirkende Abweichungen können dennoch aus unterschiedlichen Ursachen resultieren. Die Kausalität ist schwerer ablesbar als bei baugleichen Elementen. Daher sind im Rahmen dieser Untersuchungen versuchsweise

unterschiedliche Methoden erdacht und angewandt worden um die entstehenden Abweichungen zu determinieren und den möglichen Ursachen zuzuordnen. Dazu gehört auch wieder das Mittel der *Charakterisierenden Darstellung* und deren Überlagerung (Abb. 4.6-60).

### Kontaktflächen Referenzbauteile

Zur Auswertung der Kontaktflächen wurden die Referenzbauteile mittels der sechs Referenzpunkte ausgerichtet (die Bauteile wurden beidseitig mit je drei Referenzpunkten ausgeführt. Eine vergleichende Ausrichtung über die Eckpunkte konnte nicht erfolgen, da die Bauteile in zusammengebauten Zustand erfasst wurden und somit nur drei Kontaktflächen pro Bauteil erfasst werden konnten. Daher ist die genaue Position dieser Eckpunkte unklar. Die Fertigung der Kontaktflächen ist in gleicher Art und Weise erfolgt wie auch die später gefertigten Schalenelemente. Beide Bauteile weisen ein deutliches Übermaß von bis zu 1.80mm an Pos. 2 auf. Beim Referenzbauteil 1 verläuft die Hinterseite von rechts (-0.10mm) nach links (+0.76mm). Abgesehen von diesem Verlauf illustriert die charakterisierende Darstellung einen relativ parallelen Verlauf und ein homogenes Oberflächenbild der Kontaktflächen (Abb. 4.6-61).

# (+1.56) (+1.80) (E6.0+) (+0.89) (+0.41)

Abb. 4.6-61: Überlagerung der Abweichungen der Kontaktflächen der Referenzbauteile nach 6p Ausrichtung

### Messergebnis 3p Ausrichtung

### Rotation

Die Messergebnisse über die 3p Ausrichtung weisen allgemein eine leichte Rotation von oben betrachtet gegen den Uhrzeigersinn auf. Die Mittelwerte der Abweichungen Pos.7 bis Pos.1 liegen im negativen, Pos. 2 bis Pos. 6 im positiven Bereich.

Im Mittel liegt die Abweichung bei Pos.1 bei -0.41mm und Pos.8 bei -0.39mm. Die Abweichung der gegenüberliegenden Position 4 (+1.19mm) und 5 (+0.29mm). Die Abweichung der Position 2 (+0.11mm) und 3 (+0.69mm). Die Abweichung der gegenüberliegenden Position 6 (+1.06mm) und 7 (+0.81mm) (Abb. 4.6-62).

Die Überlagerung der charakterisierenden Abweichungen illustriert diese Rotation, die sich im Bereich von ca. 0.05° - 0.1° bewegt.

Wichtig ist, diese Rotation als Resultat und nicht als Ursache zu begreifen. Ob die Ursache eine Verdrehung der Aufspannvorrichtung geschuldet ist, einem ungünstigen Hebel bei der Zustellung oder einer dritten unbekannten Ursache kann an dieser Stelle nicht eindeutig geklärt werden.

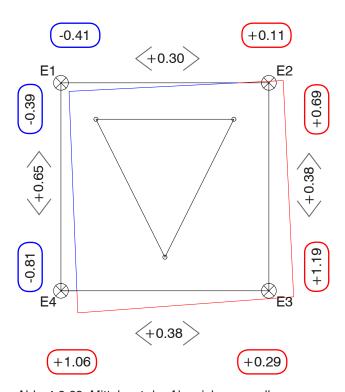


Abb. 4.6-62: Mittelwert der Abweichungen aller neun Kontaktflächen nach 3p Ausrichtung

Abweichungen	3р	<b>Ausrichtung</b>

Pos. 1		Pos. 2		Pos. 3		Pos. 4	
1	-0.62	1	+0.54	1	+0.45	1	+1.08
2	+0.07	2	-0.04	2	+0.66	2	+0.99
3	-0.16	3	-0.89	3	+0.16	3	(+0.57)
4	-0.72	4	(+0.97)	4	+0.91	4	+1.82
5	-0.57	5	(-0.52)	5	(+1.36)	5	+0.81
6	+0.05	6	+0.59	6	+0.59	6	+1.10
7	-0.51	7	+0.01	7	+0.93	7	+0.82
8	-0.27	8	+0.59	8	+0.96	8	(+2.22)
9	(-0.92)	9	-0.21	9	+0.20	9	+1.26
Mittelwert	-0.41		+0.11		+0.69		+1.19
Pos. 5		Pos. 6		Pos. 7		Pos. 8	
1	+0.07	1	+1.42	1	(-0.30)	1	(+0.46)
2	-0.01	2	+0.92	2	-0.82	2	-0.34
3	+1.03	3	+0.74	3	-0.84	3	(-1.06)
4	(-0.15)	4	+1.08	4	-0.99	4	-0.56
5	+1.16	5	+1.21	5	+0.18	5	-0.30
6	-0.13	6	+0.76	6	-1.13	6	-0.60
7	+0.53	7	+0.87	7	-0.51	7	-0.31
8	-0.05	8	+1.37	8	-1.41	8	-0.05
9	+0.20	9	+1.26	9	-1.44	9	-0.82
Mittelwert	+0.29		+1.06		-0.81		-0.39
Abweichungen 4p Ausrichtung							
Abirololiai	igon ap Au	orionitaring					
Pos. 1	igon ap Au	Pos. 2		Pos. 3		Pos. 4	
Pos. 1		Pos. 2	(+0.43)		+0.42		+0.78
Pos. 1 1 (4p)	+0.01	<b>Pos. 2</b>	+0.43 +0.02	1	+0.42	1	+0.78 +0.28
Pos. 1 1 (4p) 2 (4p)	+0.01	<b>Pos. 2</b> 1 2	+0.02	1 2	-0.24	1 2	+0.28
Pos. 1 1 (4p) 2 (4p) 3 (4p)	+0.01 (-0.03) +0.45	Pos. 2  1 2 3	+0.02 +0.02	1	-0.24 -0.48	1 2 3	+0.28 -0.13
Pos. 1 1 (4p) 2 (4p) 3 (4p) 4 (4p)	+0.01 -0.03 +0.45 -0.19	<b>Pos. 2</b> 1 2	+0.02 +0.02 +0.22	1 2 3	-0.24 -0.48 +0.08	1 2	+0.28 -0.13 +0.08
Pos. 1 1 (4p) 2 (4p) 3 (4p) 4 (4p) 5 (8p)	+0.01 (-0.03) +0.45	Pos. 2  1 2 3 4	+0.02 +0.02	1 2 3 4	-0.24 -0.48	1 2 3 4	+0.28 -0.13
Pos. 1 1 (4p) 2 (4p) 3 (4p) 4 (4p) 5 (8p) 6 (8p)	+0.01 -0.03 +0.45 -0.19 -0.13	Pos. 2  1 2 3 4 5	+0.02 +0.02 +0.22 +0.28	1 2 3 4 5	-0.24 -0.48 +0.08 +0.23	1 2 3 4 5	+0.28 -0.13 +0.08 +0.49
Pos. 1 1 (4p) 2 (4p) 3 (4p) 4 (4p) 5 (8p)	+0.01 -0.03 +0.45 -0.19 -0.13 +0.02	Pos. 2  1 2 3 4 5	+0.02 +0.02 +0.22 +0.28 +0.22	1 2 3 4 5 6	-0.24 -0.48 +0.08 +0.23 -0.21	1 2 3 4 5	+0.28 -0.13 +0.08 +0.49 -0.03
Pos. 1 1 (4p) 2 (4p) 3 (4p) 4 (4p) 5 (8p) 6 (8p) 7 (4p)	+0.01 -0.03 +0.45 -0.19 -0.13 +0.02 +0.18	Pos. 2  1 2 3 4 5 6 7	+0.02 +0.02 +0.22 +0.28 +0.22 +0.34	1 2 3 4 5 6 7	-0.24 -0.48 +0.08 +0.23 -0.21 +0.17	1 2 3 4 5 6 7	+0.28 -0.13 +0.08 +0.49 -0.03 +0.03
Pos. 1 1 (4p) 2 (4p) 3 (4p) 4 (4p) 5 (8p) 6 (8p) 7 (4p) 8 (4p)	+0.01 -0.03 +0.45 -0.19 -0.13 +0.02 +0.18 +0.49	Pos. 2  1 2 3 4 5 6 7	+0.02 +0.02 +0.22 +0.28 +0.22 +0.34 +0.22	1 2 3 4 5 6 7 8	-0.24 -0.48 +0.08 +0.23 -0.21 +0.17 +0.17	1 2 3 4 5 6 7 8	+0.28 -0.13 +0.08 +0.49 -0.03 +0.03
Pos. 1 1 (4p) 2 (4p) 3 (4p) 4 (4p) 5 (8p) 6 (8p) 7 (4p) 8 (4p) 9 (4p)	+0.01 -0.03 +0.45 -0.19 -0.13 +0.02 +0.18 +0.49 +0.12	Pos. 2  1 2 3 4 5 6 7	+0.02 +0.02 +0.22 +0.28 +0.22 +0.34 +0.22 +0.03	1 2 3 4 5 6 7 8	-0.24 -0.48 +0.08 +0.23 -0.21 +0.17 +0.17	1 2 3 4 5 6 7 8	+0.28 -0.13 +0.08 +0.49 -0.03 +0.03 +0.80 -0.19
Pos. 1  1 (4p) 2 (4p) 3 (4p) 4 (4p) 5 (8p) 6 (8p) 7 (4p) 8 (4p) 9 (4p)  Mittelwert  Pos. 5	+0.01 -0.03 +0.45 -0.19 -0.13 +0.02 +0.18 +0.49 +0.12 +0.10	Pos. 2  1 2 3 4 5 6 7 8 9	+0.02 +0.02 +0.22 +0.28 +0.22 +0.34 +0.22 +0.03	1 2 3 4 5 6 7 8 9	-0.24 -0.48 +0.08 +0.23 -0.21 +0.17 +0.17 -0.15	1 2 3 4 5 6 7 8 9	+0.28 -0.13 +0.08 +0.49 -0.03 +0.80 -0.19 +0.23
Pos. 1  1 (4p) 2 (4p) 3 (4p) 4 (4p) 5 (8p) 6 (8p) 7 (4p) 8 (4p) 9 (4p)  Mittelwert  Pos. 5  1 (4p)	+0.01 -0.03 +0.45 -0.19 -0.13 +0.02 +0.18 +0.49 +0.12 +0.10	Pos. 2  1 2 3 4 5 6 7 8 9	+0.02 +0.02 +0.22 +0.28 +0.22 +0.34 +0.22 +0.03 +0.20	1 2 3 4 5 6 7 8 9	-0.24 -0.48 +0.08 +0.23 -0.21 +0.17 +0.17 -0.15	1 2 3 4 5 6 7 8 9	+0.28 -0.13 +0.08 +0.49 -0.03 +0.03 +0.80 -0.19 +0.23
Pos. 1  1 (4p) 2 (4p) 3 (4p) 4 (4p) 5 (8p) 6 (8p) 7 (4p) 8 (4p) 9 (4p)  Mittelwert  Pos. 5  1 (4p) 2 (4p)	+0.01 -0.03 +0.45 -0.19 -0.13 +0.02 +0.18 +0.49 +0.12 +0.10 +0.22 -0.11	Pos. 2  1 2 3 4 5 6 7 8 9  Pos. 6 1 2	+0.02 +0.02 +0.22 +0.28 +0.22 +0.34 +0.22 +0.03 +0.20	1 2 3 4 5 6 7 8 9 <b>Pos. 7</b> 1 2	-0.24 -0.48 +0.08 +0.23 -0.21 +0.17 +0.17 -0.15 -0.05	1 2 3 4 5 6 7 8 9 <b>Pos. 8</b> 1 2	+0.28 -0.13 +0.08 +0.49 -0.03 +0.03 +0.80 -0.19 +0.23
Pos. 1  1 (4p) 2 (4p) 3 (4p) 4 (4p) 5 (8p) 6 (8p) 7 (4p) 8 (4p) 9 (4p)  Mittelwert  Pos. 5  1 (4p) 2 (4p) 3 (4p)	+0.01 -0.03 +0.45 -0.19 -0.13 +0.02 +0.18 +0.49 +0.12 +0.10 +0.22 -0.11 +0.11	Pos. 2  1 2 3 4 5 6 7 8 9  Pos. 6 1 2 3	+0.02 +0.02 +0.22 +0.28 +0.22 +0.34 +0.22 +0.03 +0.20 +0.20	1 2 3 4 5 6 7 8 9 <b>Pos. 7</b> 1 2 3	-0.24 -0.48 +0.08 +0.23 -0.21 +0.17 +0.17 -0.15 -0.05	1 2 3 4 5 6 7 8 9 <b>Pos. 8</b> 1 2 3	+0.28 -0.13 +0.08 +0.49 -0.03 +0.03 +0.80 -0.19 +0.23 -0.02 +0.55 -0.09
Pos. 1  1 (4p) 2 (4p) 3 (4p) 4 (4p) 5 (8p) 6 (8p) 7 (4p) 8 (4p) 9 (4p)  Mittelwert  Pos. 5  1 (4p) 2 (4p) 3 (4p) 4 (4p)	+0.01 -0.03 +0.45 -0.19 -0.13 +0.02 +0.18 +0.49 +0.12 +0.10 +0.22 -0.11 +0.11 +0.52	Pos. 2  1 2 3 4 5 6 7 8 9  Pos. 6 1 2 3 4	+0.02 +0.02 +0.22 +0.28 +0.22 +0.34 +0.22 +0.03 +0.20 +0.11 +0.49	1 2 3 4 5 6 7 8 9 <b>Pos. 7</b> 1 2 3 4	-0.24 -0.48 +0.08 +0.23 -0.21 +0.17 +0.17 -0.15 -0.05	1 2 3 4 5 6 7 8 9 <b>Pos. 8</b> 1 2 3 4	+0.28 -0.13 +0.08 +0.49 -0.03 +0.03 +0.80 -0.19 +0.23  -0.02 +0.55 -0.09 -0.13
Pos. 1  1 (4p) 2 (4p) 3 (4p) 4 (4p) 5 (8p) 6 (8p) 7 (4p) 8 (4p) 9 (4p)  Mittelwert  Pos. 5  1 (4p) 2 (4p) 3 (4p) 4 (4p) 5 (8p)	+0.01 -0.03 +0.45 -0.19 -0.13 +0.02 +0.18 +0.49 +0.12 +0.10 +0.22 -0.11 +0.11 (+0.52) +0.17	Pos. 2  1 2 3 4 5 6 7 8 9  Pos. 6 1 2 3 4 5	+0.02 +0.02 +0.22 +0.28 +0.22 +0.34 +0.22 +0.03 +0.20 +0.11 +0.49 +0.70	1 2 3 4 5 6 7 8 9 <b>Pos. 7</b> 1 2 3 4 5	-0.24 -0.48 +0.08 +0.23 -0.21 +0.17 +0.17 -0.15 -0.05 +1.01 -0.01 -0.23 +0.54 +0.27	1 2 3 4 5 6 7 8 9 <b>Pos. 8</b> 1 2 3 4 5	+0.28 -0.13 +0.08 +0.49 -0.03 +0.80 -0.19 +0.23  -0.02 +0.55 -0.09 -0.13 +0.34
Pos. 1  1 (4p) 2 (4p) 3 (4p) 4 (4p) 5 (8p) 6 (8p) 7 (4p) 8 (4p) 9 (4p)  Mittelwert  Pos. 5  1 (4p) 2 (4p) 3 (4p) 4 (4p) 5 (8p) 6 (8p)	+0.01 -0.03 +0.45 -0.19 -0.13 +0.02 +0.18 +0.49 +0.12 +0.10 +0.22 -0.11 +0.11 +0.52 +0.17 +0.18	Pos. 2  1 2 3 4 5 6 7 8 9  Pos. 6 1 2 3 4	+0.02 +0.02 +0.22 +0.28 +0.22 +0.34 +0.22 +0.03 +0.20 +0.11 +0.49	1 2 3 4 5 6 7 8 9 <b>Pos. 7</b> 1 2 3 4	-0.24 -0.48 +0.08 +0.23 -0.21 +0.17 +0.17 -0.15 -0.05 +1.01 -0.01 -0.23 +0.54 +0.27 +0.04	1 2 3 4 5 6 7 8 9 <b>Pos. 8</b> 1 2 3 4	+0.28 -0.13 +0.08 +0.49 -0.03 +0.03 +0.80 -0.19 +0.23  -0.02 +0.55 -0.09 -0.13 +0.34 +0.25
Pos. 1  1 (4p) 2 (4p) 3 (4p) 4 (4p) 5 (8p) 6 (8p) 7 (4p) 8 (4p) 9 (4p)  Mittelwert  Pos. 5  1 (4p) 2 (4p) 3 (4p) 4 (4p) 5 (8p) 6 (8p) 7 (4p)	+0.01 -0.03 +0.45 -0.19 -0.13 +0.02 +0.18 +0.49 +0.12 +0.10 +0.22 -0.11 +0.11 +0.52 +0.17 +0.18 +0.27	Pos. 2  1 2 3 4 5 6 7 8 9  Pos. 6 1 2 3 4 5 6 7	+0.02 +0.02 +0.22 +0.28 +0.22 +0.34 +0.22 +0.03 +0.20 +0.49 +0.49 +0.70 +0.82	1 2 3 4 5 6 7 8 9 <b>Pos. 7</b> 1 2 3 4 5 6	-0.24 -0.48 +0.08 +0.23 -0.21 +0.17 +0.17 -0.15 -0.05 +1.01 -0.01 -0.23 +0.54 +0.27 +0.04 +0.43	1 2 3 4 5 6 7 8 9 <b>Pos. 8</b> 1 2 3 4 5 6	+0.28 -0.13 +0.08 +0.49 -0.03 +0.03 +0.80 -0.19 +0.23  -0.02 +0.55 -0.09 -0.13 +0.34 +0.25 +0.35
Pos. 1  1 (4p) 2 (4p) 3 (4p) 4 (4p) 5 (8p) 6 (8p) 7 (4p) 8 (4p) 9 (4p)  Mittelwert  Pos. 5  1 (4p) 2 (4p) 3 (4p) 4 (4p) 5 (8p) 6 (8p)	+0.01 -0.03 +0.45 -0.19 -0.13 +0.02 +0.18 +0.49 +0.12 +0.10 +0.22 -0.11 +0.11 +0.52 +0.17 +0.18	Pos. 2  1 2 3 4 5 6 7 8 9  Pos. 6 1 2 3 4 5 6	+0.02 +0.02 +0.22 +0.28 +0.22 +0.34 +0.22 +0.03 +0.20 +0.40 +0.40 +0.49 +0.70 +0.82 +0.32	1 2 3 4 5 6 7 8 9 <b>Pos. 7</b> 1 2 3 4 5 6 7	-0.24 -0.48 +0.08 +0.23 -0.21 +0.17 +0.17 -0.15 -0.05 +1.01 -0.01 -0.23 +0.54 +0.27 +0.04	1 2 3 4 5 6 7 8 9 <b>Pos. 8</b> 1 2 3 4 5 6 7	+0.28 -0.13 +0.08 +0.49 -0.03 +0.03 +0.80 -0.19 +0.23  -0.02 +0.55 -0.09 -0.13 +0.34 +0.25

### Verlauf

Der Verlauf beträgt im Mittel von Pos. 1 zu Pos.2 +0.52mm, von Pos.3 zu Pos.4 +0.50mm von Pos.5 zu Pos.6 +0.77mm und von Pos.7 zu Pos.8 +0.42mm. Während durch eine Rückrotation die Eckbereiche 1-3 als sehr parallel verlaufendes Übermaß angesehen werden könnten, verläuft die Kontaktfläche vom Eckpunkt 3 zum Eckpunkt 4 ein noch um ca. +0.35mm. Dies macht sich in einem erhöhten Übermaß und einem Winkelfehler bemerkbar (Abb. 4.6-62).

### Kippen und Schnittdruck

Die Unterschiede zwischen den oberen und unteren Punkten der Kontaktfläche sind sehr gering (in der Regel  $<\pm0.10$ mm) und deuten keine Tendenzen in eine bestimmte Richtung an. Ein relevantes vertikales Kippen des Schleifstifts aufgrund des Schneiddrucks kann daher ausgeschlossen werden.

### Messergebnis 4/8p-Ausrichtung

Die Ausrichtungsmethode über die vier/acht Eckpunkte der Schalenelemente führt immanent zu einer ausgemittelten Positionierung des Bauteils. Eine gleichmäßigere Verteilung der Abweichungen ist die Folge, die Zusammenhänge von Fertigung und tatsächlicher Ausrichtung bleiben unberücksichtigt. Dennoch zeigt diese Methode einige Charakteristika der Fertigung auf, die mit der 3p Ausrichtung allein nur schwer ersichtlich wären (Abb. 4.6-63).

So wird zum einen der Verlauf der Schnittkante von Pos. 5 zu Pos. 6 deutlich und ein generelles Übermaß der Bauteile ersichtlich.

Im Mittel liegt die Abweichung bei Pos.1 bei +0.10mm und Pos.8 bei +0.16mm. Die Abweichung der gegenüberliegenden Position 4 (+0.23mm) und 5 (+0.10mm). Die Abweichung der Position 2 (+0.20mm) und 3 (-0.05mm). Die Abweichung der gegenüberliegenden Position 6 (+0.33mm) und 7 (+0.54mm).

Die Messungen zeigen ein gesamtes Übermaß der Platten von E1 nach E2 von +0.11mm, E2 nach E3 von 0.30mm, E3 zu E4 von 0.56mm und E4 zu E1 von 0.64mm. Dies entspricht auf ±0.20mm den ermittelten Werten der 3p Ausrichtung (Abb. 4.6-64).

# Pos.1 (Pos.2) (Pos.2) (Pos.4) (Pos.6) (Pos.5)

Abb. 4.6-63: Überlagerung der Abweichungen aller neun Kontaktflächen nach 4p Ausrichtung

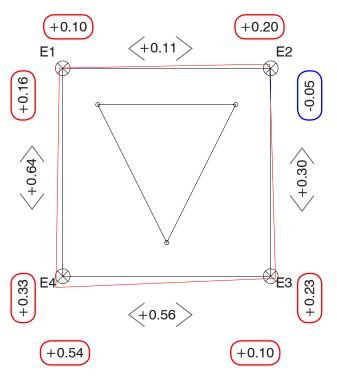


Abb. 4.6-64: Mittelwert der Abweichungen aller neun Kontaktflächen nach 4p / 8p-Ausrichtung

### Beurteilung der Fertigungsgenauigkeit

Relative Beurteilungsmaßstäbe Die Frage welches Bauteil am genauesten ge-



Abb. 4.6-65: maximales Übermaß bei Kontaktfläche Bauteil 8 links



Abb. 4.6-66: maximaler Rücksprung bei Kontaktfläche Bauteil 9 rechts

maximale Abweichung maximale Abweichung Зр 4p Bt. min. max. Rang Bt. min. max. Rang 1 -0.62+1.421 -0.02+1.012 -0.01 +0.922 -0.24+1.029 1 3 -1.06+1.035 3 -0.48+0.457 -0.994 +1.828 4 -0.19+0.543 5 -0.57 +1.363 5 -0.13+0.705 6 -1.13 +1.106 6 -0.03 +0.826 7 -0.51 2 7 +0.03+0.431 +0.938 -1.41 +2.228 +0.17+0.634 -1.44 +1.26+0.432 9 7 9 -0.19

Abb. 4.6-67: Maximale Abweichungen

fertigt ist, lässt sich nur relativ beurteilen und unterscheidet sich je nach den gewählten Kriterien. Auch werden hier ähnliche und nicht gleiche Bauteile miteinander verglichen, was eine absolut gültige Aussage erschwert.

Weitere Begründungen zu differenzierter Betrachtung finden sich auch wieder bei der Ausrichtung. Geht man von einer durchgängigen Rotation durch eine Abweichung bei der Aufspannung der Schalenelemente aus, eignet sich die 4p-Ausrichtung gut zu einer Beurteilung der auftretenden Ungenauigkeiten, da diese Rotation weitgehend ausgeblendet wird. Ist diese Abweichung der Steifigkeit der Fräsanlage oder einer anderen nur schwer oder gar ganz unabänderlichen systemimmanenten Eigenschaft geschuldet, ist die 3p Ausrichtung die maßgebende Beurteilungsgrundlage.

Grundsätzlich differiert die Fertigungsgenauigkeit der Schalenelemente stark zwischen den Bauteilen. So wird das maximale Übermaß der Testserie wird mit +2.22mm bei Bauteil Nr.8 Pos.4 gemessen (Abb. 4.6-65), der größte Rücksprung bei Bauteil Nr. 9 Pos.7 mit -1.44mm (Abb. 4.6-66).

### Maximale Abweichungen

Ermittelt man die Differenz zwischen größter Abweichung positiv und größter Abweichung negativ, ist das Bauteil mit dem geringsten Abweichungen bei der 3p Ausrichtung das Schalenelement 2, mit einer Abweichung von +0.92mm bis -0.01mm. Die größten Abweichungen werden mit +2.22mm bis -1.41mm bei Bauteil 8 erreicht. Bei er 4p Ausrichtung sind diese deutlich geringer und bewegen sich zwischen +0.03mm und +0.43mm bei Schalenelement 7 und -0.24mm und +1.02mm bei Schalenelement 2 (Abb. 4.6-67).

### Fazit

Die Gegenüberstellung der unterschiedlich ausgerichteten Abweichungen illustriert die Bedeutung des in Form einer Rotation auftretenden Fehlers. Das über die 4p Ausrichtung ermittelte Übermaß deutet zumindest teilweise auf den Werkzeugverschleiß als Ursache hin, sollte aber nicht darauf reduziert werden, da durchgängig alle Bauteile ein Übermaß aufweisen. Auch werden die mittels Schieblehre ermittelten Durchmesserreduktionen der Schleifstifte von den Bauteilen nicht erreicht. Daher muss auch der Schnittdruck bei weiteren Untersuchungen als weitere Ursache in Betracht gezogen werden.

# 4. Ergebnisse und Auswertungen

## 4.7 Zusammenfassung der ermittelten Abweichungen

### **Einleitung**

Im Folgenden werden noch einmal die auftretenden Abweichungen der unterschiedlichen Prozessschritte zusammengefasst und erläutert.

Dadurch soll eine zusammenfassende Aussage über die Ursache "Woher kommen die Abweichungen?", die Quantität "Wie groß sind die durchschnittlichen Abweichungen?" und die Qualität "Wie wirken sich die Abweichungen aus?" getroffen werden.

Die Abweichungen teilen sich in die Produktion der Schalenelemente, von der Einstellung des Pixelfeldes bis zum entschalten Element und in das Formatschleifen der Schalenelemente.

### **Einstellung Pixelfeld Durchschnitt** in % in mm >0.1 >-1.00 -1.00 - -0.85 >0.1 -0.85 - -0.70 >0.1 -0.70 - -0.55 >0.1 -0.55 - -0.40 0.42 -0.40 - -0.25 3.51 -0.25 - +0.2575.9 -0.25 - +0.4013.0 +0.40 - +0.555.89 +0.55 - +0.70 0.52 +0.70 - +0.85 0.21 +0.85 - +1.00>0.1 >+1.00>0.1

Abb. 4.7-1: Abweichungsverteilung "Einstellung Pixelfeld"

### Abweichungen Referenz gefräst

Durchschnitt	in mm	in %
	>-1.00	0.12
	-1.000.85	0.04
	-0.850.70	0.05
	-0.700.55	0.06
	-0.550.40	0.12
	-0.400.25	8.01
	-0.25 - +0.25	58.4
	-0.25 - +0.40	14.2
	+0.40 - +0.55	11.3
	+0.55 - +0.70	5.58
Ī	+0.70 - +0.85	2.00
	+0.85 - +1.00	0.07
	>+1.00	0.12

Abb. 4.7-2: Abweichungsverteilung "Referenz gefräst"

### Produktion der Schalenelemente

### Einstellung Pixelfeld

Die Einstellung des Pixelfeldes ist der genaueste robotische Fabrikationsprozess, noch vor dem Fräsen der Referenzbauteile und dem Formatschleifen. 75.9% befinden sich innerhalb der nominellen Toleranz von <±0.25mm (Abb. 4.7-1). Die Abweichungen wirken sich sehr direkt aus. Sie werden durch die aufgelegte Schalhaut SH40 10mm kaum gemindert und bilden sich sichtbar auf der Schalung ab.

Die vergleichend gefrästen MDF-Schalungen zur Herstellung der Referenzbauteile sind in leicht geringerer Genauigkeit hergestellt. 58.4% befinden sich innerhalb der nominellen Toleranz von <±0.25mm (Abb. 4.7-2). Sie stellen allerdings die auch die verwendete Schalung dar, benötigen also keine weiteren Herstellungsverfahren, und benötigen keine weitere Kontrolle bei der Produktion.

### Ursachen

An zwei Punkten werden bei der digitalen Umarbeitung der Geometrie in die Ansteuerungsdatei Vereinfachungen im Script vorgenommen. Zum einen ist hier die Auflösung in eine Punktwolke von 915 Punkten zu nennen, die beim kleinsten einstellbaren Radius zu einer Abweichung von bis zu  $\pm 0.21$ mm führen kann. Dieser Wert wird aufgrund der geringeren Krümmungen meist deutlich unterschritten.

Der zweite Punkt betrifft die Reduktion zur Berechnung des Abstandes der Kontaktpunkte auf dem Pixel und der einzustellender Fläche. Aufgrund der Reduktion des Pixelkopfes auf 13 Punkte, kann die daraus entstehende Abwei-

chung im ungünstigsten Fall bis zu -+0.73mm betragen. Diese Abweichungen bilden sich auf der Sandschalung ausschließlich negativ ab und resultieren somit in positiven Abweichungen auf dem Schalenelement.

### Potential zur Optimierung

Durch die Verwendung eines Pixelfeldes mit höherer Auflösung kann die Abweichung reduziert werden. Die für eine schnelle Berechnung ausgelegt Vereinfachung der Pixelköpfe kann höher aufgelöst werden.

Die Einstellungsprozedur selbst zeigt keinen zwingenden Optimierungsbedarf. Notwendig ist für die weitere Verwendung eine fortwährende Kontrolle der Einstellungen, um die Toleranzen überschreitenden Abweichungen (beispielsweise <+1.50mm bei Schalenelement 5) auszuschließen. Dann erscheinen durchgehende Toleranzen von  $<\pm0.25$ mm erreichbar. Ein Automatisierungsmechanismus wird in Kapitel 5.2 vorgeschlagen.

### Abformungsprozesse Sandform 3p

Anmerkung: Die in Kapitel 4.4 aufgrund der Ausrichtungsmethode vollzogene Relativverschiebung von -0.50mm wird in dieser zum besseren Verständnis und Vergleich wieder rückgerechnet. Die hier angegebenen Maße sind im Vergleich zur Messung also relativ verschoben. Dies dient nur der Vereinheitlichung der Angabe und ist nicht mit einer Korrektur zu verwechseln.

Bei der Herstellung der Sandform 3p steigt die Abweichung an. Die nominellen Toleranzwerte von  $<\pm0.25$ mm wird nur noch von 38.6% unterschritten (Abb. 4.7-3). Auch sie stehen den 58.4% nominellen Toleranzwert der MDF-Schalung gegenüber.Eine Toleranz von  $<\pm1.00$ mm wird von durchschnittlich 96.5% der Sandform eingehalten.

### Ursachen

Die Ursachen liegen in den Fertigungstoleranzen der verwendeten Pixel ( $<\pm0.20$ mm, stichprobenartig überprüft), und der Schalhaut Sh40 10mm ( $<\pm0.65$ mm, visuell gemessen). Die Abweichung der Schalhaut bilden sich invertiert auf der Sandschalung ab. Wo die Materialstärke lokal zunimmt, nimmt die Schalung lokal ab und umgekehrt. Dieser Effekt invertiert sich ein weiteres Mal bei der der Betonage. In der Folge ist das Bauteil an einer zu dicken Stelle der Matte ebenfalls zu dick.

Das lokale Einpressen der Pixel in die Matte (<+0.30mm) wird dem Verdichtungsprozess

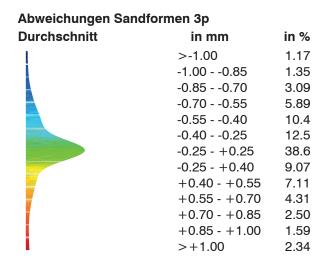


Abb. 4.7-3: Abweichungsverteilung "Sandformen 3p"

#### Abweichungen Sandformen Offset **Durchschnitt** in mm in % >-1.00 4.98 -1.00 - -0.85 1.54 -0.85 - -0.70 1.94 -0.70 - -0.55 2.58 -0.55 - -0.40 3.42 -0.40 - -0.25 4.39 -0.25 - +0.25 23.2 8.30 -0.25 - +0.40 +0.40 - +0.55 9.24 +0.55 - +0.709.22 +0.70 - +0.85 8.72 +0.85 - +1.007.70 > +1.0015.0

Abb. 4.7-4: Abweichungsverteilung "Sandformen Offset"

### Abweichungen Sandformen gesamt **Durchschnitt** in mm in % >-1.00 3.08 -1.00 - -0.85 1.45 -0.85 - -0.70 2.52 -0.70 - -0.55 4.24 -0.55 - -0.40 6.91 -0.40 - -0.25 8.45 -0.25 - +0.2530.9 -0.25 - +0.40 8.69 +0.40 - +0.558.18 +0.55 - +0.70 6.77 +0.70 - +0.856.61 +0.85 - +1.004.65 >+1.008.67

Abb. 4.7-5: Abweichungsverteilung "Sandformen gesamt"

### Abformgenauigkeit von Sand auf Beton

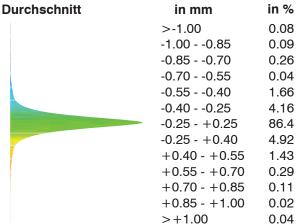


Abb. 4.7-6: Abweichungsverteilung Best Fit

### Abweichungen Best-Fit Ausrichtung

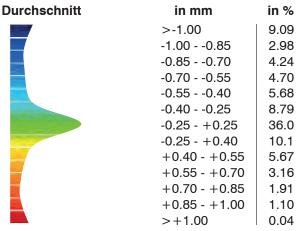


Abb. 4.7-7: Abweichungsverteilung "Schalenelemente Best Fit"

### **Abweichungen 3p Ausrichtung**

Durchschnitt	in mm	in %
	>-1.00	26.2
	-1.000.85	3.58
	-0.850.70	3.78
	-0.700.55	3.80
	-0.550.40	4.07
	-0.400.25	4.07
	-0.25 - +0.25	14.0
	-0.25 - +0.40	4.01
	+0.40 - +0.55	4.09
	+0.55 - +0.70	4.10
	+0.70 - +0.85	3.80
	+0.80 - +1.00	4.14
	>+1.00	19.8

Abb. 4.7-8: Abweichungsverteilung "Schalenelemente 3p"

bei der Herstellung der Sandschalung zugeordnet. Die Abweichungen bilden sich auf der Sandschalung ausschließlich positiv ab und somit in negativen Abweichungen auf dem Schalenelement.

### Potential zur Optimierung

Die geometrischen Abweichungen lassen sich sowohl bei den verwendeten Pixeln, als auch bei der Schalhaut, entweder durch eine niedrige Fertigungstoleranz dieser und/oder durch das Einmessen und Referenzieren im verwendeten Script reduzieren. Das Einpressen der Schalhaut lässt sich durch die Verwendung einer Schalhaut mit anderen materiellen Eigenschaften reduzieren, beispielsweise mit der im Vergleich getesteten Schalhaut mit einer Shorehärte SH60. Hierbei sind aber unter Umständen andere negative Verhaltensweisen auf Grundlage der höheren Steifigkeit zu erwarten.

### Abformungsprozesse Sandform Offset

Bei der Herstellung der Sandform Offset steigt die Abweichung noch einmal an. Die nominellen Toleranz von <±0.25mm wird nur noch von 23.2% unterschritten (Abb. 4.7-4). Eine Toleranz vom <±1.00mm wird von 80.0% der Sandform eingehalten.

### Ursachen

Die Ursachen und Auswirkungen sind grundsätzlich ident mit denen der schon zur Herstellung der Sandform 3p verwendeten Elastomermatte 10mm SH40. Sie unterscheidet sich nur in der Quantität, da die beiden verwendeten Schalhäute in Summe höhere Abweichungen zur Folge hat  $(<\pm 1.00$ mm, visuell gemessen)

### Potential zur Optimierung

Siehe Abformungsprozesse Sandform 3p.

### Betonage der Bauteile

Durch die Betonage der Bauteile erfolgt keine relevante Zunahme der Abweichungen. während des Aushärtungsprozesses. Die Übertragungsgenauigkeit von der Formsandschalung auf die Sichtflächen der Schalenelemente ist sehr hoch. 86,4% der Abweichungen befinden sich innerhalb der nominellen Toleranz von < ±0.25mm, mehr als 99% innerhalb der Toleranz von  $<\pm 1.00$ mm (Abb. 4.7-6).

Durch das Zusammenbauen der Schalungen mittels genauer Abstandshalter im Randbereich, werden diese im Abstand von 50mm zueinander orientiert. Die aufgetretenen Abweichungen der Sandschalung schlagen sich daher in lokalen Verformungen nieder, das gesamte Verformungsbild orientiert sich entsprechend.

Daher sind die Abweichungen der Schalenelemente nach einer Best-Fit Ausrichtung geringer als die durchschnittlichen Abweichungen der Sandschalungen. 36.0% befinden sich innerhalb der nominellen Toleranz von  $<\pm0.25$ mm (Abb. 4.7-7).

Bei der 3p Ausrichtung reduziert sich dieser Wert auf 14.0% <±0.25mm (Abb. 4.7-8). Zur Begründung siehe S. 122 "Zu den Wirkungsweisen der beiden Ausrichtungsmethoden 3p und Best-Fit"). Die einzige zu beachtende Abweichungsquelle ist der Betondruck, der potentiell die Schalungen auf der Unterseite auseinanderrückt. Diese Quelle konnte durch fortwährende Überprüfung fast komplett ausgeschlossen werden. Sie bewegt sich im Rahmen von <+0.25mm.

### Abweichungen Formatschleifen

Die durchschnittliche Abweichung nach 3p Ausrichtung beträgt <+1.20mm und <-0.90mm. Sie repräsentiert die durchschnittliche Abweichung der Fertigung mittels Formatschleifen. Eine Hauptrichtung der Abweichungen liegt in Form einer Rotation vor. Dies wird über die Messung nach 4p Ausrichtung dokumentiert. Die Abweichungen reduzieren sich hierbei auf <+0.55mm und <-0.05mm. An den meisten Stellen herrscht ein Übermaß.

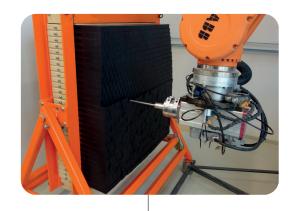
### Ursache

Die Ursache für die Rotation ist nicht zu klären. Eine Möglichkeit wäre das leicht verdrehte positionieren der Aufspannung (~0.05-0.10°). Für das durchschnittliche Übermaß der Platten wird der Schleifstiftverschleiß als Ursache gesehen. Auch ein leichtes Auslenken des Schleifstiftes aufgrund des Schnittdrucks ist zusätzlich möglich.

### Potential zur Optimierung

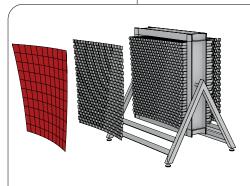
Optimierungspotential besteht hier vor allem durch fortlaufende Überwachung des Werkzeugverschleißes und durch eine angepasste Korrektur der Werkzeugbahnen. Dies kann durch das von ABB© angebotenen Force Control©, ein mit einem Kraftsensor ausgestattetes Funktionspaket Messung und Steuerungsbeeinflussung der verwendeten Industrieroboter, erfolgen oder alternativ durch die Integration eines externen hochauflösenden Sensors (siehe Kapitel 5.3).

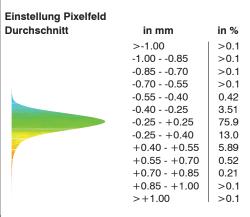
### Abweichungsverlauf während des Produktionsprozesses der Schalenelemente





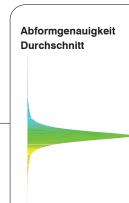








Abweichungen Sandformen 3p				
Durchschnitt	in mm	in %		
	>-1.00 -1.000.85 -0.850.70 -0.700.55 -0.550.40 -0.400.25	1.17 1.35 3.09 5.89 10.4 12.5		
	-0.25 - +0.25 -0.25 - +0.40 +0.40 - +0.55 +0.55 - +0.70 +0.70 - +0.85 +0.85 - +1.00 >+1.00	38.6 9.07 7.11 4.31 2.50 1.59 2.34		



Abweichungen Sandformen Offset				
Durchschnitt	in mm	in %		
	>-1.00	4.98		
	-1.000.85	1.54		
	-0.850.70	1.94		
	-0.700.55	2.58		
	-0.550.40	3.42		
	-0.400.25	4.39		
	-0.25 - +0.25	23.2		
	-0.25 - +0.40	8.30		
	+0.40 - +0.55	9.24		
	+0.55 - +0.70	9.22		
	+0.70 - +0.85	8.72		
	+0.85 - +1.00	7.70		
	>+1.00	15.0		



Sand auf Beton

in %

0.08

0.09

0.26

0.04

1.66

4.16

86.4

4.92

1.43

0.29

0.11

0.02

0.04

in mm

-1.00 - -0.85

-0.85 - -0.70

-0.70 - -0.55

-0.55 - -0.40

-0.40 - -0.25

-0.25 - +0.25

-0.25 - +0.40

+0.40 - +0.55

+0.55 - +0.70

+0.70 - +0.85

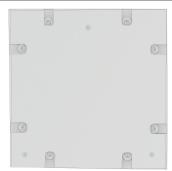
+0.85 - +1.00

>+1.00

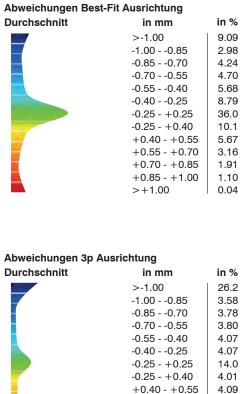
>-1.00

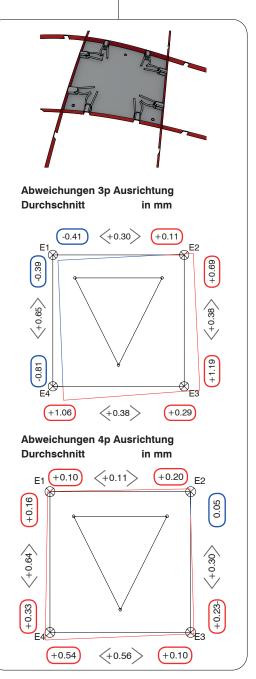






0			0
0	0		0





+0.55 - +0.70

+0.70 - +0.85

+0.80 - +1.00

>+1.00

4.10

3.80

4.14

19.8

161

### Resümee zu den Bauteiltoleranzen

Die Schalenelemente konnten mit einer Abweichung in Dickenrichtung mit einer durchschnittlichen Abweichung von <±1.50mm (nach Best-Fit Ausrichtung) gefertigt werden. Die Höhe dieser Abweichungen ist hauptsächlich den Fertigungstoleranzen der verwendeten Schalhäute geschuldet. Durch die Verwendung präziserer Bauteile im Herstellungsprozess, ist eine deutliche Reduktion dieser Abweichungen und somit eine Fertigungsgenauigkeit auf <±0.50mm zu erwarten.

Die Kontaktflächen der Bauteile konnten mit einer durchschnittlichen Abweichung von <±1.20mm gefertigt werden (nach 3p Ausrichtung). Die Hauptabweichung resultierte aufgrund einer Rotation der Bauteile während der Fertigung. Eine Ausrichtung über die vier Eckpunkte zeigte eine deutlich reduzierte Abweichung von <+0.55mm und <-0.05mm. Diese Abweichung zeugt von der Wechselwirkung von Schleifstift und zu bearbeitenden Körper. Durch im Fabrikationsprozess integrierte Messverfahren lassen sich diese weiter reduzieren und somit eine Fertigungsgenauigkeit auf <±0.25mm erwarten.

Die Vermessung der Bauteile hat sowohl die Fertigungstoleranzen der einzelnen Arbeitsschritte, als auch die Ursachen, Auswirkungen und Weitergaben an die folgenden Schritte erörtert, und somit Ansätze zu einer Optimierung der Fertigungsprozesse geliefert.

Somit sind eine Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit und die ursprünglich angestrebten Toleranzen möglich.

Der Zusammenbau des Mock-Ups ist erfolgreich verlaufen, weshalb im folgenden Kapitel die Auswirkung der Abweichungen der Einzelelemente auf dieses Mock-Ups untersucht werden, und somit eine erste Diskussion zur den Auswirkungen der Fertigungstoleranz möglich ist, bevor im abschließenden Kapitel "Sensory Parametrics" neue Konzepte zu einer feedbackbasierten automatisierten Produktion und somit zu einer höheren Fertigungsgenauigkeit vorgeschlagen werden.

### Abweichungsquelle

### Wiederholgenauigkeit ABB IRB 6660

### Einstellgenauigkeit Pixelfeld

Fertigungstoleranz Pixel
Fertigungstoleranz Elastomermatte 10mm
lokale Deformation (Pixelabdruck)
Reduktion auf Polylinie mit 30/31 Punkten
Abstandsberechnung über 13 Punkte/Pixel

### Abweichungen auf Sandform 3p

Fertigungstoleranz Elastomermatte 50mm

### **Abweichungen auf Sandform Offset**

Abformgenauigkeit von Sandform auf Beton

### Abweichungen Bauteile Ausrichtung 3p

### **Abweichungen Bauteile Best Fit**

Verschleiß Schleifstift (bis zu 0.65mm)

Abweichungen Kontaktflächen Ausrichtung 3p

Abweichungen Kontaktflächen Ausrichtung Best Fit

### Abweichungen im Messverfahren

Wiederholgenauigkeit Messarm tatkil Wiederholgenauigkeit Messarm visuell Messabweichung Ausrichtung 3p Messabweichung Ausrichtung Eckpunkte Überlagerung der Kontaktflächen

# Zusammenfassung der ermittelten maximal möglichen und nominellen Abweichungen und ihrer Quellen

in mm	Anmerkung
<±0.11	Werksangabe, 7 Achse nicht überprüft
max. <±1.00	bei 99.4% erreicht, taktil gemessen
nom. <±0.25	bei 75.9% erreicht, taktil gemessen
<±0.20	stichprobenartig überprüft
<±0.60	visuell gemessen, nur im Randbereich
<+0.30	visuell gemessen, nur positiv
<±0.21	Berechnungsabweichung im Script
max. <-0.73	Berechnungsabweichung im Script, Maximalwert,
durch. <-0.20	praktisch werden 0.20mm nie Überschritten
max. <±1.00	bei 96.5% erreicht, visuell gemessen
nom. <±0.25	bei 30.9% erreicht, visuell gemessen
<±1.00	visuell gemesssen, im Randbereich
<±1.00	bei 80.0% erreicht, visuell gemessen
nom. <±0.25	bei 23.2% erreicht, visuell gemessen
Ausgleich der Abweichungen beim Zusammenb	au der Schalungen, definierter Abstand von 50 mm
max. <±1.00	bei 86.4% erreicht, visuell gemessen
nom. <±0.25	bei >99.0% erreicht, visuell gemessen
max. <±1.00	bei >90.9% erreicht, visuell gemessen
nom. <±0.25	bei >36.0% erreicht, visuell gemessen
max. <±1.00	bei >54.0% erreicht, visuell gemessen
nom. <±0.25	bei >14.0% erreicht, visuell gemessen
<+1.30	max. mögliche Auswirkung auf Bauteil, nur positiv
<+1.20	visuell gemessen, Mittelwert
<-0.90	visuell gemessen, Mittelwert
<+0.55	visuell gemessen, Mittelwert
<-0.05	visuell gemessen, Mittelwert
<±0.038	Werksangabe, nicht überprüft
<±0.038 <±0.079	Werksangabe, nicht überprüft Werksangabe, nicht überprüft
<±0.079 <±0.17	durch empirische Tests ermittelt
<±0.17 <±0.35	durch empirische Tests ermittelt
<±0.00 <±0.20	durch empirische Tests ermittelt
₹±0.20	daron empinoone 163ta emillet



# 4. Ergebnisse und Auswertungen

### 4.8 Mock-Up

### Messprozeduren, Datenerfassung und Auswertung

### Vermessung des Gesamtmodells

Die neun Schalenelemente wurden im Einzelnen vermessen und ihre Abweichungen zum digitalen Original ermittelt und dokumentiert. Im abschließenden Versuch werden nun die neun Schalenelemente im zusammengeschraubten und aufgehängten Zustand vermessen. Dadurch sollen die Auswirkungen der Fertigungstoleranzen auf die Gesamtgeometrie untersucht werden.

Dazu wurden folgende Methoden angewandt. Zum einen die Überprüfung der Kontaktflächen auf auftretende Spaltmaße und zweitens die Positionsgenauigkeit der Bauteile im Vergleich mit dem digitalen Original.

Diese Ergebnisse werden den erwarteten Abweichungen gegenübergestellt, welche zum einen der Aufsummierung der ermittelten Abweichungen der Einzelteile entsprechen (siehe Kapitel 4.6) und zweitens aus einer Positionierung in Form einer N-Punkt Ausrichtung der digital erfassten Bauteile.

### Beurteilungskriterien

Eingangs dieses Kapitels soll festgehalten werden, das nur wenige Kriterien zur Beurteilung der Fertigungsgenauigkeit vorliegen. Das wohl entscheidende Kriterium ist die Form- und Maßhaltigkeit der Kontaktfuge. Diese wurde Eingangs des Forschungsprojektes auf  $\sim \pm 0.25$ mm festgelegt und das zur Verfügung stehende Robotersystem auf dies Wiederhohlgenauigkeit ausgelegt. Die in der Arbeit "Fügtechnik im UHPC-Schalenbau" von Gerhard Santner ausgeführten Untersuchungen haben diese Anforderung aber nicht genauer spezifiziert.

### Referenzen

Die schon in Kapitel 2.1 zitierten Forschungsarbeiten sind im Rahmen ihrer Ausarbeitung nur teils auf die erreichbaren Fertigungsgenauigkeiten untersucht worden. Eine ähnlich detaillierte Ausarbeitung wie in dieser Arbeit wurde nicht gefunden. Dennoch sollen die erhaltenen Informationen an dieser Stelle kurz Erwähnung finden, um einen Stand Technik zur Diskussion stellen zu können.

### ADAPA Adaptive Mould

Die Formgenauigkeit der produzierten Elemente wird mit <±1.0mm, bei einer Grundfläche des Schaltischs von 1200x1200mm, angegeben. Tests die beweisen oder erläutern, dass und wie diese Genauigkeit mit dem vorhandenen System zu erreichen ist, werden nicht gezeigt. Eine Formatierung der Schalenelemente oder eine individuelle Bearbeitung der Kontaktfläche wird zwar postuliert<sup>72</sup>, wird aber weder in Funktion näher erläutert, noch in praktischen Versuchen nachgewiesen (Abb. 4.8-1).



Abb. 4.8-1: Gefertigte Platten, auf Abstand gefügt

72 http://adapa.dk/ Zugriff: 05.05.2016



Abb. 4.8-2: Zusammenbau einer Wachsschalung aus acht vorgefertigten Schalungsteilen



Abb. 4.8-3: Formatfräsen eines Keramikelements

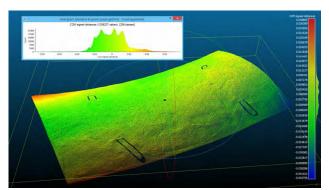


Abb. 4.8-4: Scan eine Betonelementes (Shipper)

### ETH Zürich - TailorCrete73

Die Formgenauigkeit der Einstellung wird mit  $<\pm 1.0$ mm, die der produzierten Wachsschalung mit  $<\pm 3.0$ mm angegeben. Diese Genauigkeit wird durch zwei Maßnahmen erreicht.

- 1. Durch ein "Curve-Fitting" als eine Optimierung der gewünschten Geometrie entsprechend der Schaltischkonfiguration.
- 2. Durch einen Laserscan gestützter iterativer Einstellungsprozess, bei dem die Schalung zyklisch gemessen und dann nach und nach angepasst wird. Da das Fertigungsprinzip für eine Vorort-Schalung eingesetzt wird, ist eine Betrachtung der Kanten von geringer Bedeutung (Abb. 4.8-2).

### MAP+S Group - 3d-Printing Ceramics

Die Formgenauigkeit der Schalung selber wird nicht beschrieben. Eine Kontaktfläche zwischen verschieden Bauteilen gibt es nicht, da es sich bei der Anwendung im Rahmen des Projektes um einzeln aufgehängte Elemente einer Sonnenschutzfassade handelt. Die Bauteile werde durch eine Fräsbearbeitung formatiert (Abb. 4.8-3). So ist die Maßhaltigkeit an die Wiederhohlgenauigkeit des fräsenden Roboters gekoppelt.

### TU Delft Flexible Mouldprojekt

Einzelne Experimente haben die Abweichungen zweier gefertigter Bauteile auf > ±10.0mm quantifiziert<sup>74</sup> (Abb. 4.8-4). Die Ausmaße der Bauteile wurden dabei mit ca. 2000x1000x50mm angegeben.

### Forschung in der Luftfahrtindustrie

Im Rahmen des adaptiven Formenbaus der Luftfahrtindustrie sind vorwiegend im amerikanischen Raum Studien durchgeführt worden, die ähnliche Konzepte zur Formgebung vorschlugen. Diese Systeme wurden zur Verformung von Blechen eingesetzt und mit entsprechend hohen Anforderungen an die Formgenauigkeit (beispielsweise ±0.08mm) konzipiert<sup>75</sup>.

### Fazit

Die recherchierten Beispiele stellen nur bedingt Referenz für die folgenden Messungen dar. Die angewandten Messverfahren und Kriterien sind auf Grundlage der vorangegangen Messung gewählt und entwickelt.

73 Interview mit Oesterle, S. geführt von Felix Amtsberg am 12.10.2016

74 Schipper, H. R. Double-curved precast concrete elements: Research into technical viability of the flexible mould method. Diss. TU Delft, Delft University of Technology, 2015. S.158

75 Munro, C. and Walczyk, D. Reconfigurable pin-type tooling: a survey of prior art and reduction to practice, in Journal of manufacturing science and engineering 129.3 (2007): 551-565, S.562

### Rahmenbedingungen

### Grundlagen der Messungen

Die Messungen wurden wieder mit dem für die Einzelmessungen verwendeten Systemen (Romer© Messarms zur Datenerfassung, Geomagic Control© zur Auswertung) durchgeführt. Das zum Abgleich verwendete digitale Modell ist die in Rhinoceros© erstellte Geometrie.

### Mock-Up, Aufbau und Lagerbedingung

Die neun Schalenelemente wurden zusammengebaut und auf einer Stahlunterkonstruktion aufgelagert (Abb. 4.8-5). Dazu wurden in die außenliegenden Aussparungen der Spannschlossverbindungen der Bauteile 1, 2, 7 und 9, Ringschrauben eingedreht und das Mock-Up aufgeständert (Abb. 4.8-6). Die Lagerung hat auch einen Einfluss auf das Verformungsverhalten des Mock-Ups unter Eigenlast. Dabei beeinflussen nicht nur die Auskragungen, sondern auch Einspannmomente und kleine Lagertoleranzen die endgültige Form des Objektes. Für einen Soll/Ist-Vergleich werden die Scans der gefertigten Schalenelemente mit dem digitalen Gesamtmodell verglichen.

### Referenz- und Testgeometrie

Das digitale Gesamtmodell (Referenz) besteht aus den 18 Sichtflächen, den auf der Unterseite befindlichen Aussparungen für die Einmesskegel und den außenliegenden Kontaktflächen. Es wurde ausgerichtet und als Objektdatei aus Rhinoceros© in Geomagic© importiert (Abb. 4.8-7).

Das zu testende digitale Modell besteht aus den in den Einzelscans erfassten Schalenelementen. Diese wurden in ihrer Auflösung von ca. 5 Mio. Polygonen auf 2 Mio. reduziert um die Datenmenge aller neun Bauteile in einer auf ein vom verfügbaren Computer berechenbares Maß zu reduzieren.

### Analoge Messungen

Um möglichst verlässliche Aussagen zu Ursachen und Auswirkungen der auftretenden Abweichungen treffen zu können und die Plausibilität der erhaltenen Daten zu überprüfen, wurden neben der digitalen Erfassung noch ergänzende analoge Messungen durchgeführt. So wurden die Übermaße der Kontaktflächen an den Stoßfugen mit einem Messschieber ermittelt und die Spaltmaße der Fugen mit einer Fühlerlehre gemessen. Sie finden im folgenden Abschnitt zur Auswertung noch nähere Betrachtung.



Abb. 4.8-5: Mock-Up zur Messung aufgebaut



Abb. 4.8-6: Auflager im Detail

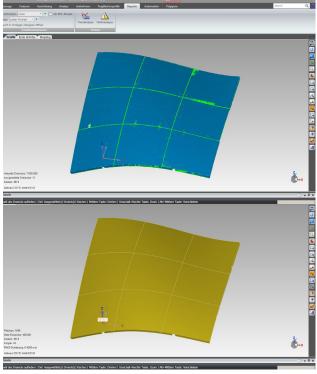


Abb. 4.8-7: Vereinigtes Gesamtmodell und digitale Referenzgeometrie



Abb. 4.8-8: Aufbau zur Erfassung der relevanten Geometriedaten

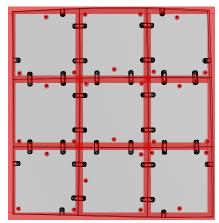


Abb. 4.8-9: Scanpattern zur Erfassung der relevanten Geometriedaten

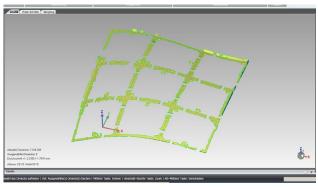


Abb. 4.8-10: Erfasste Geometriedaten des Mock-Ups

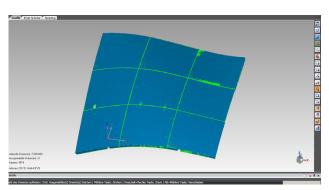


Abb. 4.8-11: Ausgerichtete und vereinigte Bauteile

### **Messung Mock-Up**

Zur Ermittlung der Auswirkungen der Fertigungsgenauigkeit der Bauteile auf die Maßhaltigkeit und Formgenauigkeit im größeren Verband, wurden diese abschließend in zusammengebautem Zustand und auf einer Unterkonstruktion auflagernd vermessen (Abb.4.8-8).

Die Vermessung erfolgte über die visuelle Erfassung und kann in folgende Schritte unterteilt werden:

- 1. Erfassung der Position der Schalenelemente: Die Position der Schalenelemente wird durch visuelles Erfassen der drei Referenzpunkte und der Bauteilkanten in verbautem Zustand bestimmt. Um den Arbeitsaufwand des Scanprozesses und die Datenmenge gering zu halten, werden nur die 27 Aussparungen und die Kanten der Unterseite erfasst (Abb.4.8-9 und -10). Aufgrund der Dimension des Objektes, musste der Scan, in mehreren von insgesamt drei Bocksprüngen unterbrochenen Schritten, erfolgen.
- 2. Ausrichtung in der digitalen Umgebung: Die in den vorherigen Messungen erfassten Schalenelemente, werden über eine N Punkt Ausrichtung an den Referenzpixeln und Bauteilkanten ausgerichtet (Abb.4.8-11).
- 3. Die so ausgerichteten Einzelelemente werden von den innenliegenden Kanten gesäubert, um Aufdoppelungen und daraus resultierende Fehler beim Vereinigen zu eliminieren.
- 4. Sie werden anschließend zu einem Gesamtmodell vereinigt. Die Referenz bildet die digitale Originalgeometrie. Die Ausrichtung und Messung des Gesamtmodells erfolgt über eine 3p Ausrichtung über die 3 Referenzkegel des Schalenelementes 5.

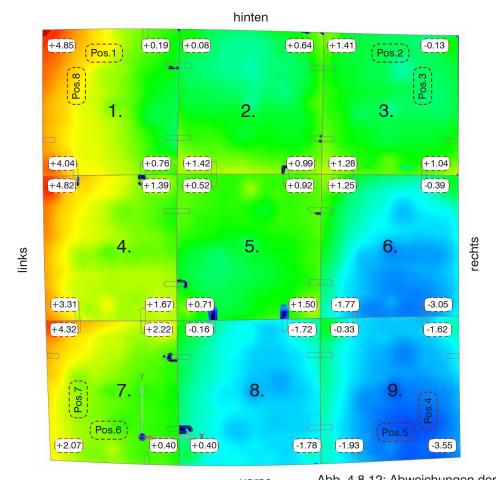


Abb. 4.8-12: Abweichungen der Sichtflächen vorne Oberseite -1.68 +0.93 +1.72 (+1.63) (+1.80) +3.80 Pos.6 Pos.5 3. 2. 1. -4.35 -0.54 -0.47 +0.50 +0.20 (+2.80) -2.86 -0.84 +0.50 -0.55 -0.12 +1.91 0 () E 6. 5. 4. -2.90 -0.37 +0.07 -0.35 -0.49 +1.69 -2.92 +0.07 -0.26 +1.01 0\_10 6) 9. 8. 0 10 Pos.1 Pos.2 -4.49 +0.59 +0.25 -0.63 -0.19 +1.58

Abb. 4.8-13: Abweichungen der Sichtflächen

Unterseite

169

hinten

### Auswertung "Mock-Up"

### Sichtfläche und Kontaktfläche

Ausgerichtet über das Schalenelement, zeigt sich ein Kippen des Bauteils diagonal von Pos. 1/8 (+4.85mm) zu Pos. 4/5 (-3.55mm) gemessen auf der Oberseite (Abb. 4.8-12) und (-4.49mm) zu (+3.80mm) gemessen auf der Unterseite (Abb. 4.8-13). Abgesehen von dieser Abweichung, deren Ursache nicht genau bestimmt werden kann, befinden sich die Abweichungen im Bereich von ±2.00mm. Die größte Abweichung zwischen zwei sich berührenden Flächen zeigt sich an der Fuge von Bauteil 5 zu Bauteil 8. Hier wirkt sich die Ausrichtung über die Unterseite bei der Montage besonders stark aus, und der Versatz beträgt mit +1.50mm (Nr. 5) zu -1.78mm (Nr. 6) über 3.0mm. Diese Abweichung ist allerdings ein Einzelfall. Durchschnittlich werden 1.0mm kaum überschritten. Aufgrund dieser Ausrichtung sind die Abweichungen der Unterseite deutlich geringer. 1.49mm im Bereich Bauteil 3 auf Bauteil 6 sind der Maximalwert. Durchschnittlich werden 0.50mm kaum überschritten.

Die Kontaktflächen weisen in der Spitze eine Abweichung von +2.57mm im Eckbereich bei Pos. 8 auf und -3.59mm im Eckbereich von Bauteil 3 bei Pos. 3 auf. Insgesamt zeigt sich eine kontinuierliche Rotation des gesamten Objektes an, die sich durch einen Verlauf von links positiv zu rechts negativ zeigt (Abb. 4.8-14). Im Durchschnitt beträgt diese 2.50mm.

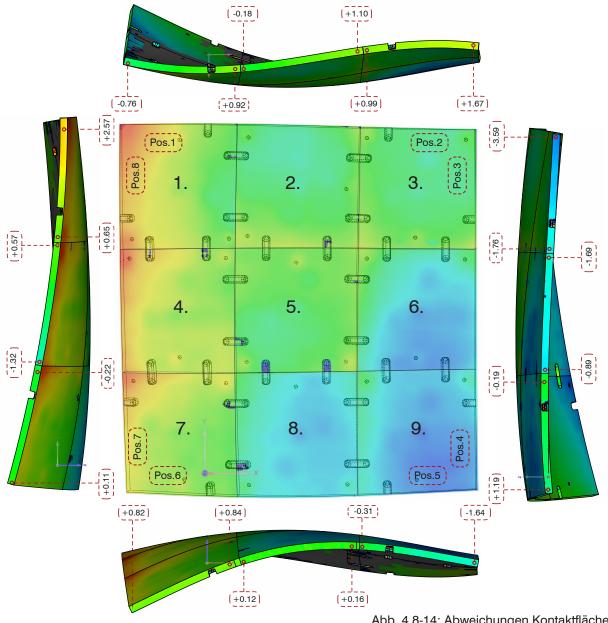


Abb. 4.8-14: Abweichungen Kontaktflächen

### Vergleichsmessung "Digital zusammengesetztes Modell"

Die durchgeführte Messung des verbauten Schalenelementes ist Abweichungen unbekannter Größe und Herkunft unterworfen. Die Lagerung auf den vier Stützen, ggf. auftretende Einspannmomente und die Verformung unter Eigenlast, erschweren die Aussage über die Kausalität von auftretenden Abweichungen.

Aus diesem Grund wurde in einer weiteren Variante eine Vergleichsmessung durchgeführt. Dazu wurden die erfassten und auf 2 Mio. Polvgone reduzierten Einzelelemente über die Kontaktflächen zusammengefügt. Die zentrale Ausrichtungsreferenz bildet das Schalenelement Nr. 5 (Abb. 4.8-15). Auf dieses Element beziehen sich die erfassten Abweichungen. Die Ausrichtung über sie Kontaktflächen ist eine 4p bzw. 8p Methode. Zuerst wurden die vier direkt an dem Schalenelement 5 anliegenden Bauteile 2, 4, 6, und 8 über die vier korrespondierenden Eckpunkte ausgerichtet (Abb. 4.8-16), und anschlie-Bend die Bauteile 1, 3, 7 und 9 über die acht korrespondierenden Eckpunkte der jeweiligen Nachbarn (z.B. Bauteil 1 an 2 und 4) angefügt (Abb. 4.8-17).

Diese Ausrichtungsmethode kann in Zusammenhang mit den genutzten Objekten die bisherigen Genauigkeiten nicht aufrechterhalten. Bei dem folgenden Beispiel wird hier von einer Abweichung von <±1.0mm im zentralen und <±2.0mm im Randbereich ausgegangen.

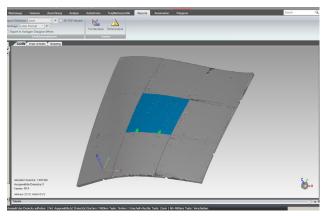


Abb. 4.8-15: Ausrichtungsreferenz Schalenelement 5

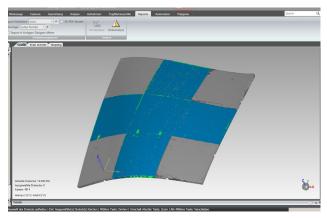


Abb. 4.8-16: Ausrichtung der Elemente 2, 4, 6 und 8 über die anliegenden Kontaktflächen (4 Eckpunkte)

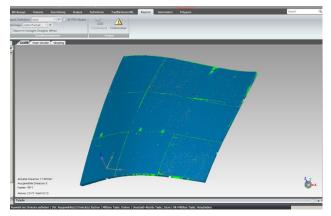


Abb. 4.8-17: Ausrichtung der Elemente 1, 3, 7 und 9 über die anliegenden Kontaktflächen (8 Eckpunkte)

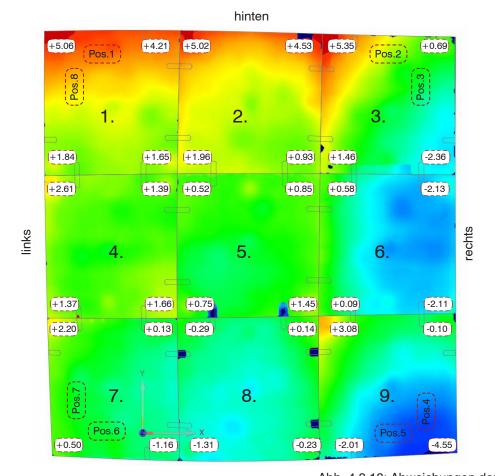


Abb. 4.8-18: Abweichungen der Sichtflächen vorne Oberseite +2.29) +0.16 +0.01 Pos.6 (+2.20) +1.14 Pos.5 +4.65 2. 3. -2.22 +1.54 -0.63 (-1.64 -3.15 +1.20 -0.97 -0.43 -0.21 -1.33 +1.15 -0.70 0 6 rechts 6. 5. 4. (3) 6 -0.52 -0.29 +0.00 +0.08 -0.31 +3.48 -0.87 -0.77 -0.84 -0.02 -0.28 +4.60 0 8. 9. Pos.1 Pos.2 o (-4.00) +0.75 -4.34 -4.23 -4.39 -3.77

Abb. 4.8-19: Abweichungen der Sichtflächen

Unterseite

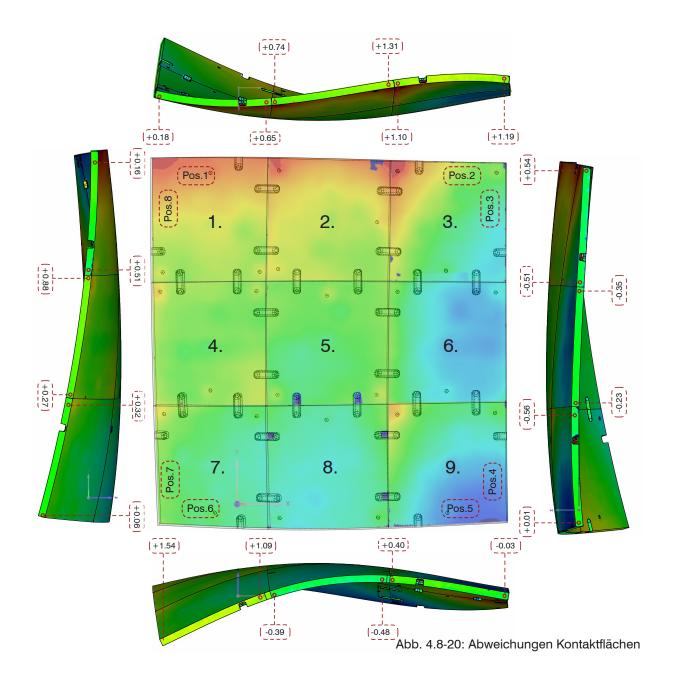
hinten

### Auswertung "Digital zusammengesetztes Vergleichsmodell"

### Sichtfläche und Kontaktfläche

Das digitale Vergleichsmodell zeigt grundsätzlich eine ähnliche Tendenz zum Kippen des Bauteils. Die Extremwerte liegen ähnlich verteilt diagonal von Pos. 1/8 (+5.06mm) zu Pos. 4/5 (-4.55mm) gemessen auf der Oberseite (Abb. 4.8-18) und (-4.34mm) zu (+4.65mm) gemessen auf der Unterseite (Abb. 4.8-19). Die Verteilung ist allerdings leicht unterschiedlich und zeigt ein Kippen der gesamten oberen Reihe, also der Bauteile 1, 2 und 3. Dieses Kippen wird unter anderem auch der Ausrichtungsform zugeschrieben, die Bauteil 1 und 3 an dem schon gekippten Bauteil 2 orientiert sind. Hiervon abgesehen befinden sich die Abweichungen im Bereich <±2.00mm.

Die Kontaktflächen weisen in der Spitze eine Abweichung von +1.54mm im Eckbereich bei Pos. 6 auf und -0.51mm im unteren Eckbereich von Bauteil 3 bei Pos. 3 auf. Die Rotation des Mock-Ups ist hier nicht mehr erkennbar, was für eine Abweichung bei der Ausrichtung des Mock-Ups spricht. Dadurch sind die Abweichungen auch geringer. Der durchschnittliche Verlauf beträgt ca. 1.25mm. Insgesamt zeigt sich eine kontinuierliche Rotation des gesamten Objektes an, die sich durch einen Verlauf von links positiv zu rechts negativ zeigt (Abb. 4.8-20). Im Durchschnitt beträgt diese 2.50mm.



### Berechnetes Übermaß der Fertigung

Eine weitere Referenz um näherungsweise einen Soll/Ist-Vergleich zu ermöglichen, wurde in folgender Form erstellt. Ausgehend von Schalenelement 5 wurden die ermittelten Abweichungen der Einzelelemente aufaddiert. Daraus ergeben sich im Randbereich die aufsummierten Abweichungen, die eine Tendenz der tatsächlich zu erwartenden Abweichungen skizzieren. Dazu wurden die in den Messungen der über die 4p Methode ausgerichteten Bauteile ermittelten Abweichungen herangezogen. Zentrum bildet wieder das Schalenelement 5, von dem aus die Aufsummierung erfolgt (Abb. 4.8-21). Die Aufsummierung stellt somit eine Vereinfachung des digitalen Vergleichsmodells dar, folgt allerding nicht der gleichen Ausrichtungsform. Die Ergebnisse sind also nur in ihrer Qualität und nicht in ihrer Qualität vergleichbar.

### Fazit

Die maximale Abweichung erfolgt, wie schon bei der Messung des Objektes im Bereich Pos. 8, ist aber mit +1.81mm deutlich geringer, ebenso die Abweichung an Pos. 3 (-0.60mm). Auch die Tendenzen des Verlaufes, von links positiv zu rechts negativ, ist erkennbar, wenn auch die Auswirkung mit ca. 1.00mm ebenfalls geringer ist.

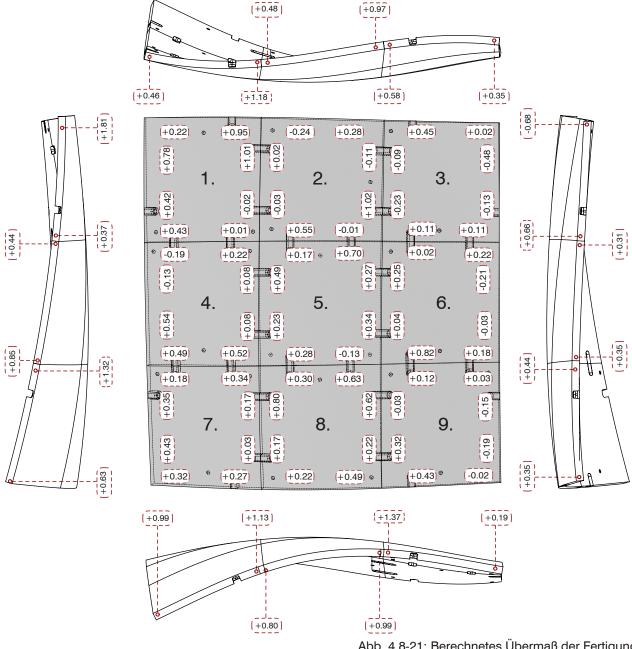


Abb. 4.8-21: Berechnetes Übermaß der Fertigung

### Relatives Übermaß der Außenkanten

Eine weitere Möglichkeit zu Überprüfung der Plausibilität der digitalen Daten, wurde durch eine Aufnahme der Außenkanten gezeigt. An den Kontaktstellen zwischen zwei verbundenen Bauteilen, wurde dazu mittels eines Messschiebers (Abb. 4.8-22) der relative Überstand/Rücksprung des einen Bauteils zu seinem Nachbarn ermittelt.

### Fazit

Die gemessenen Abweichungen bewegen sich im Bereich <1.0mm. Die maximale Abweichung wurde zwischen Bauteil 1 und 2 festgestellt, keine Abweichung waren im Bereich 1-4 und 7-8 auf diese Art erkennbar.



Abb. 4.8-22: Messbarer Überstand einer Kontaktfläche

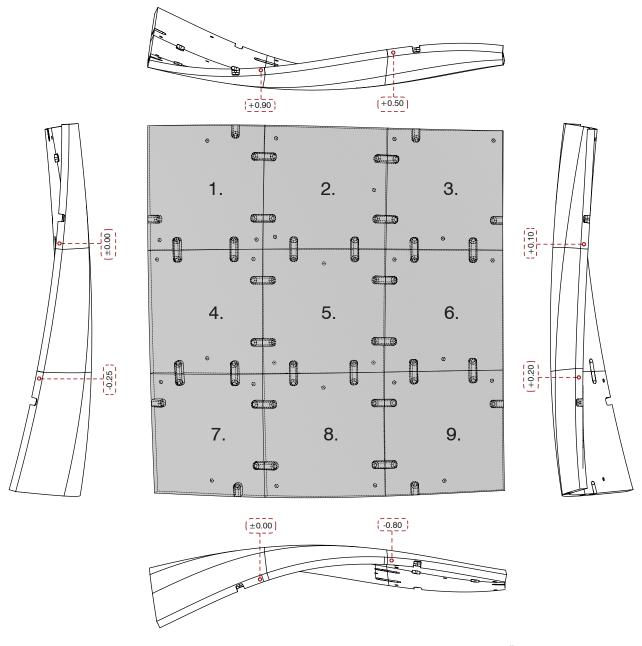


Abb. 4.8-23: Gemessenes Übermaß der Fertigung

Abb. 4.8-25: Eindringtiefe einer "ungültigen" Messung, es sind noch Bereiche der Spitz sichtbar (<~5mm)



Abb. 4.8-26: Eindringtiefe einer "gültigen" Messung, die Spitz ist komplett eingedrungen (>~5mm)

### **Spaltmaß**

Zur Ermittlung der Spaltmaße wurden alle 12 Fugen mit einer Fühlerlehre überprüft. An mindestens drei Punkten (in den Eckbereichen und mittig) wurde das auftretende Spaltmaß auf der Ober- und Unterseite ermittelt. In weiteren Untersuchungen können diese Daten dazu dienen, die Wirkung der Fertigungsabweichungen zweier sich stoßender Fugen näher zu untersuchen. Hier dienen sie nur als Anhaltspunkt für die Ursachenforschung von auftretenden Abweichungen der Gesamtgeometrie. Bei den Messungen ist beobachtet worden, dass aufgrund der Rauigkeit der Fugen und vor allem den immer wieder herausstehenden Stahlfasern ein tieferes Eindringen der Fühlerlehre nicht möglich ist, selbst dort wo eine Fuge sichtbar ist (Abb. 4.8-24). Daher wurde ein Spalt als solcher definiert und wenn das Fühlerblatt weiter als ~5mm eingedrungen ist (Abb. 4.8-25 und -26), oder wenn spürbar war, dass ein tieferes Eindringen von den Stahlfasern verhindert wird.

### Fazit

Allgemein zeigt sich ein sehr exaktes Fugenbild. Auf der Oberseite ist nur in wenigen Bereichen überhaupt ein Eindringen des dünnsten Fühlerblatt (Blattstärke 0.05mm) möglich. Die maximale Fugenbreite befindet sich in der Fuge zwischen Element 7 und 8 (Abb. 4.8-27).

Auf der Unterseite zeigen sich größere Fugen, zwischen 0.05mm und 0.20mm (Abb. 4.8-28). Diese verlaufen sehr konstant und werden der Verformung unter Eigenlast zugeschrieben.



Abb. 4.8-24: Nahansicht illustriert die rauhigkeit und zeigt die herausstehenden Stahlfasern

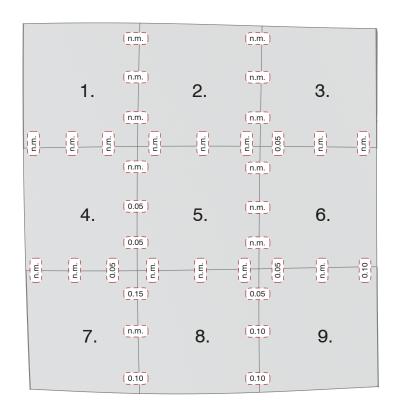


Abb. 4.8-27: Spaltmaße der Oberseite

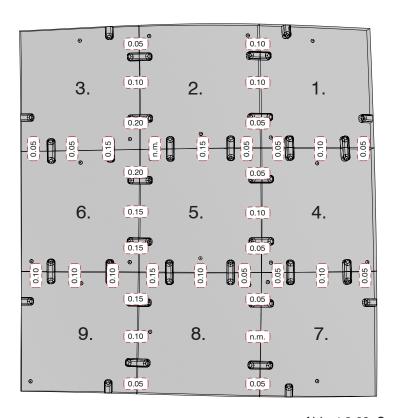


Abb. 4.8-28: Spaltmaße der Unterseite



Abb. 4.8-29: Sichtbare Abweichnungen an den Stoßfugen zwischen Bauteil 5 und 8



Abb. 4.8-30: Geringe Abweichungen am Rand des Mock-Ups

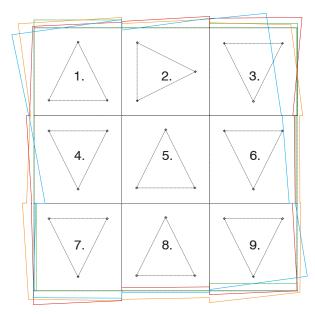


Abb. 4.8-31: Überlagerung der charakterisierenden Darstellung (Messung Mock-Up / blau), (Berechnetes Übermaß / gelb), (Digital zusammengesetztes Modell / rot) und (Messung mit Schieblehre / grün)

### Beurteilung der Abschlussmessungen

### Qualitative Auswirkungen

Die Fertigungstoleranzen haben sich nur gering auf die Fügung ausgewirkt. Alle Bauteile konnten über die Spannschlösser miteinander verbunden werden. Die Platten schließen dicht aneinander an. Die Abweichungen der Formgenauigkeit von Stoß zu Stoß sind sichtbar, befinden sich aber meist in einem Bereich von < ±1.00mm (Abb. 4.8-29). Erhöhte Spaltmaße kommen nur an wenigen Stellen und mit geringen Maßen (<0.25mm) vor. Auch die an den Außenkanten erfassten Abweichungen der Kontaktflächen sind mit maximal erfassten 0.9mm erheblich genauer, als aufgrund der Abweichungen beim Formatschleifen der Kontaktflächen zu erwarten war (siehe Kapitel 4.6). Die Abweichungen der Einzelelemente addieren sich nur gering auf (Abb. 4.8-30).

Die erreichte Formgenauigkeit ist nur schwer beurteilbar, da Lagerbedingungen und Verformung unter Eigengewicht hier nicht mit in die Betrachtung einfließen können. Sie wird aufgrund der Messungen aber mit <±5.00mm quantifiziert (Abb. 4.8-12 und -13).

### Charakterisierende Darstellung

Zur Analyse der in den verschiedenen Verfahren "Messung Mock-Up" (Abb.4 8-32), "Digital zusammengesetztes Modell" (Abb.4 8-33), "Berechnetes Übermaß" (Abb.4 8-34) und "Messung mit Schieblehre" (Abb.4 8-35) erhaltenen Daten, wurden diese noch einmal charakterisierend dargestellt und überlagert. Die Überlagerung der Mock-Up Messung entspricht dabei in vielen Bereichen dem berechneten Übermaß. Die Überstände und Rücksprünge der Randbereiche entsprechen grundsätzlich den analog, mit der Schieblehre erfassten Messungen. Auch wenn die Übereinstimmung mit dem digital zusammengesetzten Modell nicht groß ist, zeigen sich hier keine wirklichen Fehler und Alles in Allem zeigt sich eine erwartungsgemäße Korrespondenz der durchgeführten Messungen (Abb.4 8-31).

### Auswirkung auf die Anwendung

Ausgerichtet über das in der Mitte liegende Schalenelement, und reduziert für das Mock-Up, hat das verwendete Verfahren mit den erreichten Fertigungsgenauigkeiten funktioniert, und erfolgreich einen Prototypen dieses Bausystems realisiert.

Die Frage nach einer wirklichen Anwendung ist aber auch an den Entwurf gekoppelt, genauer

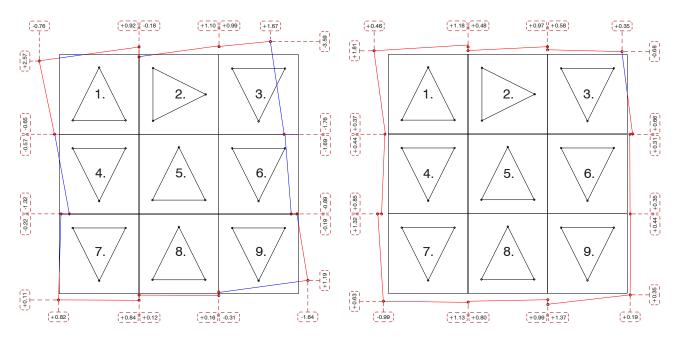


Abb. 4.8-32: Charakterisierende Darstellung "Messung Mock-Up"

Abb. 4.8-33: Charakterisierende Darstellung "Berechnetes Übermaß"

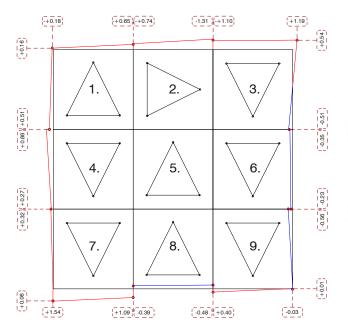


Abb. 4.8-34: Charakterisierende Darstellung "Digital zusammengesetztes Modell"

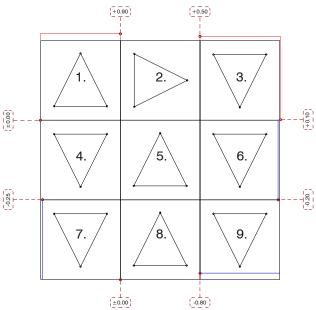


Abb. 4.8-35: Charakterisierende Darstellung "Messung mit Schieblehre"

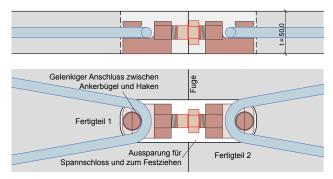


Abb. 4.8-36: Darstellung des eingesetzten Spannschlosses (Konzept Gerhard Santner)

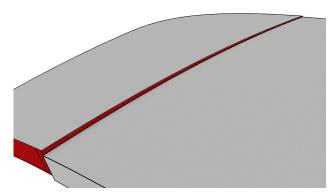


Abb. 4.8-37: Reduktion der effektiven Kontaktfläche aufgrund der Abweichungen

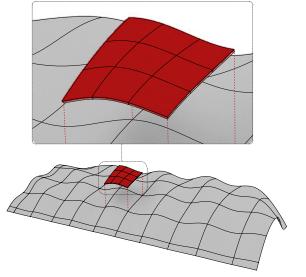


Abb. 4.8-38: Entwurf der Dachkonstruktion bestehend aus 5 x 11 Elementen (Entwurf Gernot Parmann)

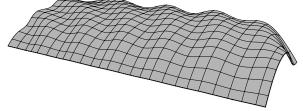


Abb. 4.8-39: Dachkonstruktion aus 11 x 25 Elementen

gesagt an die Unterteilung in vorfabrizierbare Elemente. Wie schon im Kapitel 1.1 beschrieben sind weitspannende Betontragwerke sowohl monolithisch, als auch aus einer Anzahl kleinteiliger Elemente hergestellt worden. Die Fertigungsgenauigkeit, hat zumindest bei den realisierten Projekten keine Rolle in einem vergleichbaren Maßstab gespielt, da die auftretenden Toleranzen von der Fuge aufgenommen werden konnten. Dies ist bei dem entwickelten System nur bedingt möglich. Folgende Punkte sind hierzu zu beachten:

### 1. Aufnahmefähigkeit der verwendeten Spannschlösser

Die entwickelten Spannschlösser sind in ihrer Aufnahmefähigkeit von Toleranzen wie folgt begrenzt<sup>76</sup>: ~5mm parallel zur Fuge, 3-5mm Normal zur Fuge (in Spannrichtung), abhängig von der Positionsgenauigkeit der Anker, 2mm in Dickenrichtung (Abb.4 7-36).

# 2. Auswirkung von Formabweichung auf die Kontaktfläche

Eine Quantifizierung der maximal möglichen Toleranzen kann an dieser Stelle nicht erfolgen, aber die dünnen Querschnitte der Bauteile machen diese Konstruktionsform empfindlich gegen große Abweichungen in der Formgenauigkeit. Eine durchschnittliche Abweichung von ±1.00mm reduziert die effektive Kontaktfläche bereits um 4%, von ±2.50mm um 10% (Abb.4 7-37). Dieser Verlust hat direkte Auswirkungen auf die aufnehmbaren Druckkräfte und Biegemomente.

### 3. Aufsummierung der Abweichungen Die neun gefertigten Geometrien bilden den Ausschnitt eines im Rahmen des Forschungsprojektes entworfenen Gebäudes ab. Die umhüllende Betonfreiform ist in der gewählten Unterteilung aus 5 x 11 Elementen mit einer Kantenlänge von ca. 2,40m x 2,40m herstellbar (Abb. 4.7-38). Für den Laborversuch wurde ein solches Element noch einmal in 3x3 Elemente mit einer Kantenlänge von ca. 0,80m x 0,80m unterteilt. Postuliert man nun die Auswirkungen auf ein Gesamtsystem in der geforderten Ausrichtung und Unterteilung, oder verändert einen dieser Parameter zu Ungunsten des Systems, beispielsweise aufgrund größerer Dimensionen oder durch eine kleinteiligere Unterteilung (Abb. 4.7-39), wird die Realisierung erschwert.

76 Interview mit Santner, G. geführt von Felix Amtsberg am 12.10.2016

## Ausrichtung über Eckelement Bauteil 9

Um die Wirkungsweise zu verdeutlichen, wurde in einem weiteren Versuch das Gesamtobjekt über Bauteil Nr. 9 ausgerichtet. Somit wird näherungsweise die Abweichung bei einer Feldgröße von 5 x 5 Elementen simuliert (Abb.4 8-40).

Die Abweichungen nehmen signifikant zu. An Pos. 6 beträgt die Abweichung +6.04mm an Pos. 3 -4.31mm. Auch die Fläche selbst kippt über diese Ausrichtung deutlich um bis zu +9.29mm. Auch wenn beachtet werden muss, dass die Abweichung der Messung selbst auch zunimmt, verdeutlicht diese Grafik die zu erwartende Auswirkung (Abb.4 8-41).

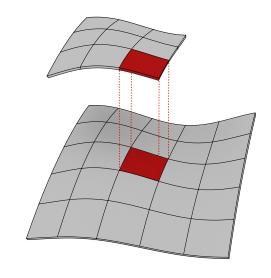


Abb. 4.8-40: Ausrichtung über Schalenelement 9 zur Abweichungssimulation eines Feldes mit 5x5 Bauteilen

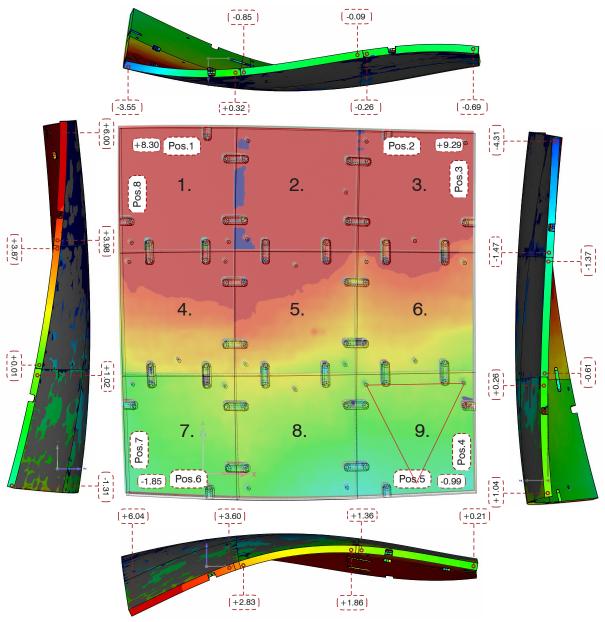


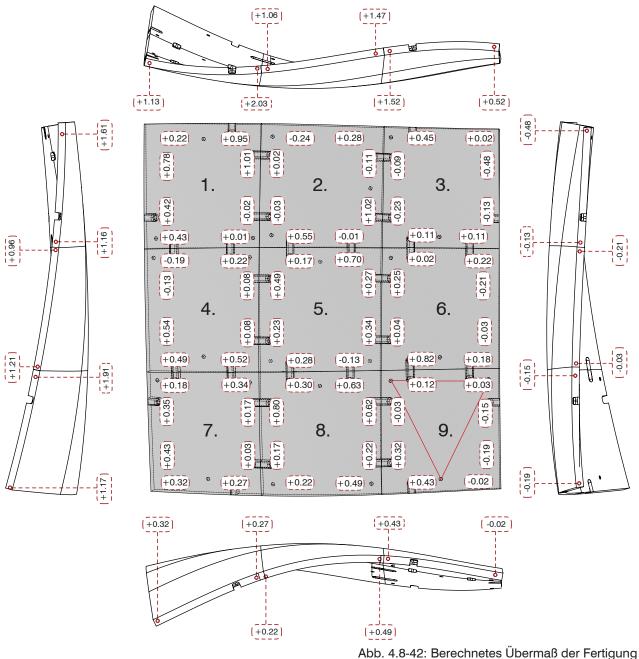
Abb. 4.8-41: Abweichungen Kontaktflächen bei Ausrichtung über Schalenelement 9

## Berechnetes Übermaß ausgerichtet über Bauteil 9

Ähnlich dem vorher abgehandelten Beispiel, der Ausrichtung über das Eckelement 9, wurden die ermittelten Abweichungen der Einzelelemente vom gleichen Ausgangspunkt aufaddiert (Abb. 4.8-42). Die Aufsummierung stellt wieder eine Vereinfachung des digitalen Vergleichsmodells dar. Wie auch schon bei der Ausrichtung über das Eckelement 9, wird so die näherungsweise die Abweichung bei einer Feldgröße von 5 x 5 Elementen simuliert.

#### Fazit

Die Abweichungen steigen entsprechend der Entfernung an. An der Stirnseite von Bauteil 1 wachsen sie auf +2.03mm (+1.18mm ausgerichtet über Bauteil 5), an Bauteil 7 auf +1.17mm (+0.63mm ausgerichtet über Bauteil 5). Bei der Erstellung von Schalen, die aus einer größeren Anzahl von Schalenelementen bestehen, ist somit auch von einer Zunahme der Abweichungen auszugehen.



## Betrachtung des Fugenbildes

Die Analyse der gefertigten Einzelelemente in Kapitel 4.6 hat gezeigt, dass die Abweichungen des Formatschleifens von ähnlicher Natur sind (Abb. 4.6-61). Sie verhalten sich in diesem Fall günstig und gleichen sich eher aus, als sich aufzusummieren. Dennoch zeigt eine Betrachtung der Fugen, dass sich bei ungünstigem Verlauf das Ergebnis signifikant verschlechtern könnte. Die Kreuzfuge der Verbindung von Bauteil 5, 6, 8 und 9 illustriert sichtbare Abweichungen in X- und Z-Achse (Abb. 4.7-42). Eine zusätzliche Abweichung in der Y-Achse, würde das Fugenbild empfindlich stören und voraussichtlich eine Öffnung der Fugen zur Folge haben.

Fazit und Verfahren zur Optimierung des Produktionsprinzips

Das im Forschungsprojekt postulierte Fertigungsprinzip hat grundsätzlich funktioniert und stellt einen vielversprechenden Beitrag zur Erweiterung des existierenden Betonbaus dar.

Um die Freiheitsgrade des Systems möglichst hoch zu halten, also eine Fügung von hochauflösenden, aus einer Vielzahl von Bauteilen bestehenden Schalen oder Freiformen zu ermöglichen, können die existierenden Systeme sowohl in ihrer Konstruktion, als auch im Fabriaktionsablauf optimiert werden.

Viele der am Schluss von Kapitel 4.6 aufgeführten Abweichungen, seien es die Pixel oder die verwendeten Schalhäute, lassen sich durch die Fertigung genauerer Bauteile oder durch exaktes Einmessen all dieser Objekte und anschließenden Einarbeitung in das Einstellungsscript, auf ein noch geringeres Maß reduzieren.

Eine weitere Quelle der Optimierung, liegt in der Betrachtung der Fabrikationsprozesse selbst. Die Analysen der vom Industrieroboter ausgeführten Arbeitsschritte "Einstellung des Pixelfeldes" und "Formatschleifen der Kontaktflächen" haben Potential zu einer Optimierung aufgezeigt. Im abschließenden Kapitel, sollen diese diskutiert und Optimierungsvorschläge erbracht werden.





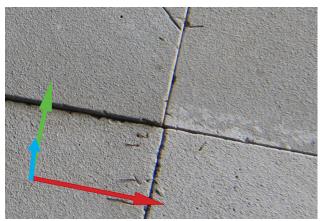
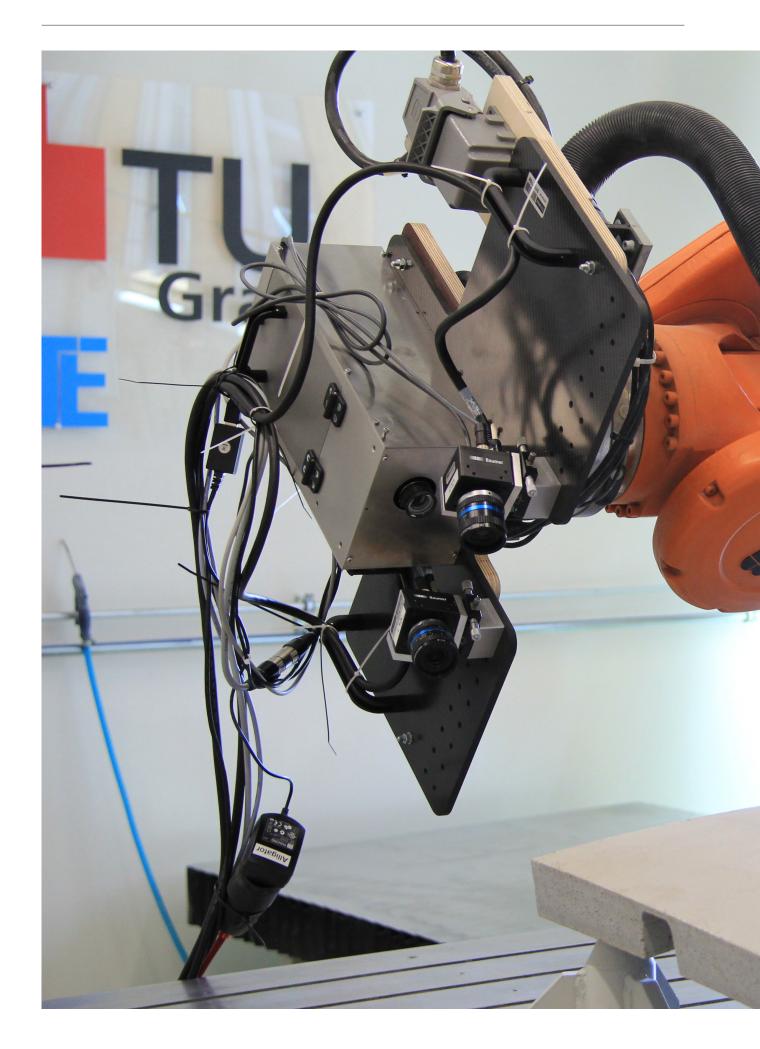


Abb. 4.8-43: Abweichungensbild, global und im Detail an einer Kreuzfuge





# 5 Sensory Parametrics

## 5.1 Sensorgestützte robotische Fabrikation

## **Einleitung**

Wie im Kapitel 4.7 erläutert, konnte mittels des entwickelten Fabrikationssystems eine freigeformte am Rechner erzeugte Geometrie, aus neun individuellen, doppelt gekrümmten Elementen hergestellt und dies zu einem Mock-Up gefügt werden. Der Industrieroboter hat sich hierbei als versatiles Werkzeug zur Produktion von hochpräzisen Betonbauteilen mit der Losgröße 1 im architektonischen Maßstab erwiesen. Dabei wurden aber auch die Grenzen der Systeme offengelegt und es zeigte sich, dass die Ausführung der verschiedenen Arbeitsschritte die grundsätzliche Wiederhohlgenauigkeit dieser Anlage von ~±0.25mm teils deutlich überschreiten. Die ermittelten Einflüsse, zum einen das Mitverschieben eines bereits eingestellten Pixels durch seinen Nachbarn oder die Wechselwirkung von Werkzeug und Werkstück beim Formatschleifen der Kontaktflächen, befinden sich jenseits des direkt Einflussbereichs der Maschine in Ihrer aktuellen Konfiguration. Ziel des folgenden, abschließenden Kapitels ist die Vergrößerung des Einflussbereiches des Roboters, durch die physische Integration visueller Sensorik und deren Einbinden in den Fabrikationsprozess.

Sensorgestützte robotische Fabrikation in der Architektur

Der Einsatz von Sensoren in der robotischen Fabrikation, ist in den vergangenen Jahre auch im Bereich der Architektur ein mehr und mehr beachtetes Thema. In diversen Projekten wurden auf verschiedensten Ebenen, Informationen gesammelt, um als gestaltgebende Parameter die Fabrikation von Architektur zu ermöglichen. Dabei ist der Zeitpunkt der Informationsgewinnung von entscheidender Bedeutung. Er kann in drei Kategorien unterteilt werden (Abb. 5.1-6):

1. Informierter Feed-forward Prozess
Hierbei dient eine spezielle Eingangsinformation als Produktionsparameter. Die Generierung des Maschinencodes erfolgt nach Erhalt dieser Information. Der Einfluss dieser Information wird individuell bestimmt. Zwei Projekte illustrieren die Möglichkeiten dieser Kommunikation.

Beim entwickelten Projekt "Bandsawn Bands" dient die Information der Bohle eines in seiner Geometrie ungewöhnlichen geformten Baumstamms als Eingangsinformation für Fabrikation und Design. Die geometrischen Daten dieser speziellen Bohle werden genutzt um eine Liege mit möglichst geringem Verschnitt herzustellen. Angepasst an diese Geometrie werden ein Schnittmuster und eine korrespondierende Anordnung der Abschnitte generiert und so von einer auf einem Industrieroboter montierte Bandsäge die Leisten zur Herstellung einer individuellen Liege gefertigt (Abb. 5.1-1 und -2)<sup>77</sup>.

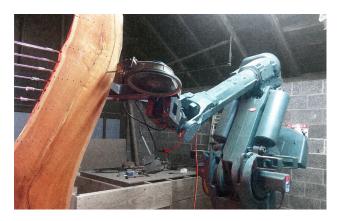




Abb. 5.1-1 und -2: Abweichnungensbild, gloabl und im Detail an einer Kreuzfuge

77 Johns, R. L, and Foley N.. "Bandsawn Bands." Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014. Springer International Publishing, 2014. 17-32.

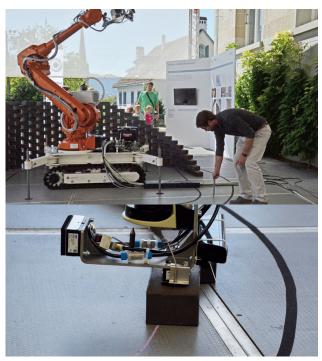


Abb. 5.1-3 und -4: Aufzeichnen eines Kreidestriches und Platzierung der Ziegel nach Erfaasen des Strichs

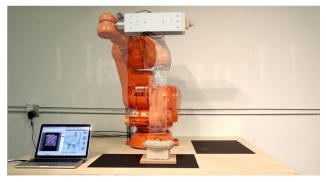


Abb. 5.1-5: Iterative Fertigung eines Werkstücks in Zyklen: Scannen, Hämmern, Scannen

Beim Projekt "Endless Wall" erkennt ein auf dem auch zur Fabrikation eingesetzten Industrieroboter platzierter visueller Sensor, einen von einem Menschen aufgezeichneten Kreidestrich und nutzt diese Information für den Grundriss einer aus Ziegel geschlichteten Mauer. Damit reagiert das Fabrikationssystem direkt auf die analoge Information des entwerfenden Nutzers, und stellt somit eine Form der "Human-Machine Interaction" dar (Abb. 5.1-3 und -4)<sup>78</sup>.

### 2. Zyklischer Feedback Prozess

Bei dieser Prozesskategorie, werden Informationen vor und/oder während des Fabrikationsprozesses entnommen und beeinflussen die weitere Vorgehensweise des Systems. Der eigentliche Arbeitsschritt wird hierzu unterbrochen. Diese Art der Informationsgewinnung ermöglicht Fabrikationszyklen, die sowohl auftretende Fehler beheben können, als auch iterative Fertigungszyklen ermöglichen.

Beispielhaft ist hier die Arbeit von Felix Raspall zu nennen, der im Rahmen seiner Dissertation einen Tonkubus durch simples Hämmern in eine doppelt gekrümmte Form gebracht hat. Dazu wird nach jeden Fabrikationszyklus eine Aufnahme der erreichten Form gemacht und über einen Soll-Ist Abgleich der nächste Arbeitsschritt erörtert. Annäherungsweise wird so nach und nach die anfangs eingegebene Form erreicht. Der Fabrikationszyklus wird beendet, wenn eine vordefinierte Toleranz unterschritten wird (Abb. 5.1-5)<sup>79</sup>.

Eine weitere Arbeit ist unter dem Namen "Stratifications" entstanden. Eine Wand wird aus Holzscheiten von verschiedener Höhe hergestellt

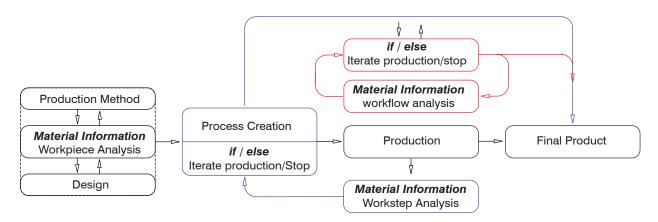


Abb. 5.1-6: Feedbackbasierte Prozessunterteilung (informiert, zyklisch, realtime)

78 Gramazio, F. Kohler, M. Willmann, J. The Robotic Touch (2013), S. 263

79 Amtsberg, F. Raspall, and Trummer, A.. *Digital-Material Feedback in Architectural Design*. Proceedings of the CAADRIA Conference, Daegu, South Korea. 2015. 630-640. S. 638

(Abb. 5.1-7). Diese Platzierung macht eine exakte Vorhersage des Verhaltens der platzierten Elemente nicht mehr vorhersagbar, weshalb die gewählte Aufbauvariante von einem Script überprüft und gegeben falls abgeändert wird. Es erfolgt also eine Reaktion auf den Ist-Zustand, die zu einer Veränderung der Produktionsstrategie führt. Das Endergebnis ist zu Fabrikationsbeginn offen<sup>80.</sup>

#### 3. Realtime Feedback Prozess

Dieser Prozess unterscheidet sich von den vorangegangenen Prozessen grundsätzlich nur durch die Geschwindigkeit des Informationsaustausches. War beim zyklischen Feedback der Fertigungszyklus unterbrochen, wird beim Realtime Feedback die Information direkt umgesetzt. Dieser Prozess bedingt eine permanente Erfassung und fortwährende Kommunikation zwischen Sensor und Roboter. So wurden im Rahmen des Workshop "All Bent Out", gedämpfte Holzlatten von einem Industrieroboter verbogen. Dieser Prozess wurde von einem Tracking System erfasst und auf Grundlage dieser Daten nachjustiert, um eine gewünschte Geometrie zu erlangen (Abb. 5.1-8)81. Ein weiteres Beispiel entstammt noch einmal den Forschungsbemühungen an der ETH Zürich. Beim Projekt "Smart Dynamic Casting" fungiert der Industrieroboter prototypisch als dynamische Kletterschalung. Diverse sich kontinuierlich verändernde Säulen können aufgrund von einer Rotationsbewegung des formgebenden Werkzeugs hergestellt werden. Die Bewegung in Z-Achse wird von einem Sensor kontrolliert und gesteuert, so dass der Beton genau zum richtigen Zeitpunkt nach und nach entschalt wird (Abb. 5.1-9)82.

#### Fazit

Dieser kurze Ausschnitt illustriert die Bandbreite der Möglichkeiten, welche durch die sensorische Erfassung und Verarbeitung materieller Information umsetzbar wird. In den folgenden Versuchen werden zwei Vorschläge zur Integration visueller Sensorsystem, in den im Projekt genutzten Fabrikationssystemen, unterbreitet und ihr Potential zur Verbesserung der existierenden Fertigungsprozesse getestet. Dabei handelt es sich jeweils um Prozesse der Kategorie "Zyklisches Feedback".



Abb. 5.1-7: Überprüfung der vorher platzierten Holzscheite zur Code-Generierung des nächsten Layers



Abb. 5.1-8: Zwei Roboter verbiegen eine Holzleiste, die Auswirkungen der Verformung werden in Echtzeit erfasst und ggf. nachjustiert

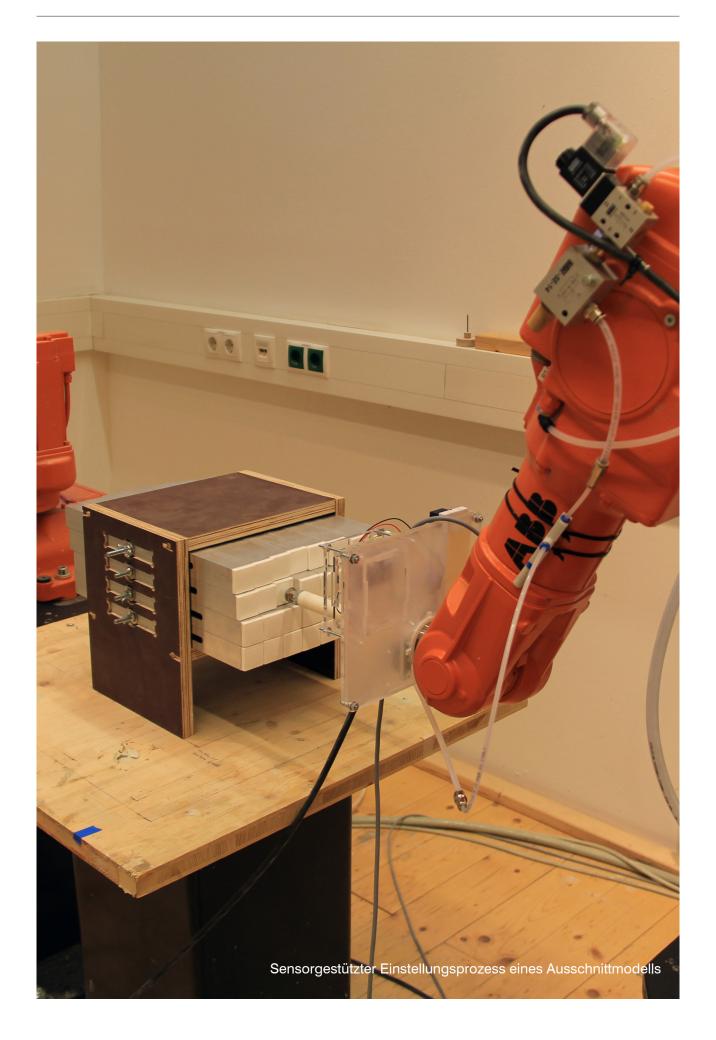


Abb. 5.1-9: Dynamischer Entschalungsprozess einer Betonsäule

80 Gramazio, F. Kohler, M. Willmann, J. The Robotic Touch (2013), S. 263

81 Schwartz, Thibault, et al. *All Bent Out.... in* Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014. Springer International Publishing, 2014. 305-317

82 Lloret, E., et al. *Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication* in Computer-Aided Design 60 (2015): 40-49.



# 5 Sensory Parametrics

## 5.2 Sensorgestützte Ansteuerung

## **Entwicklung, Funktion und Prototyp**

## Einleitung und Relevanz

Im aktuellen Abschnitt wird die Weiterentwicklung des eingesetzten Verschiebestifts zu einem intelligenten, kontrollierenden und korrigierenden Werkzeug beschrieben. Das Konzept der simplen Ansteuerung des Pixelfeldes durch Verschieben einzelner Pixel hat grundsätzlich sehr gut funktioniert, bedingt aber eine permanente Beaufsichtigung des Prozesses. In wenigen Einzelfällen ist es zu einem Mitverschieben eines schon eingestellten Pixels gekommen, was durch ein händisches Zurücksetzen der gesamten Reihe und erneuten Abfahren korrigiert wurde und somit ohne Auswirkung blieb. In einem nachgewiesenen Fall, wurde dies übersehen und hat sich in einer Erhebung des Schalenelementes Nr. 5 manifestiert.

Um solche unerwünschte Fehlstellungen automatisiert zu kontrollieren und dabei das Einstellungsprinzip nicht zu verändern, wurde prototypisch ein modifizierter, mit einem Sensor ausgestatteter Endeffektor entwickelt, eine digitale Kommunikation und ein neues Einstellungsscript für den Roboter geschrieben, das eine Reaktion auf falsch eingestellte Pixel ermöglicht (Abb. 5.2-1). Dafür wurden der Sensor und der Controller des Roboters über eine digitale Schnittstelle zu einer Arbeitseinheit verbunden.

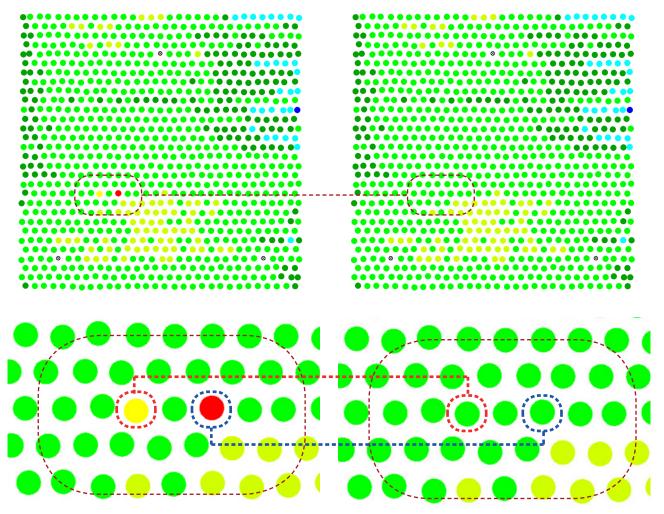


Abb. 5.2-1: Detektion außerhalb der Toleranz eingestellter Pixel (links)...

...und nach der Rejustierung (rechts)

## Einstellungstool neu (Abb. 5.2-2)

### Konzept "Ziehen und Schieben"

Der ursprüngliche simple Einstellungsstift hat zwei entscheidende Schwächen, die mit der Neuentwicklung behoben werden sollen. Zum einen erlaubt er eine Manipulation ausschließlich durch Schieben der Pixel. Da ein unbeabsichtigtes Mitverschieben des Nachbarpixels aber immer eine zu weite Einstellung zur Folge hätte, muss das neue Einstellungswerkzeug in der Lage sein, den unbeabsichtigt verschobenen Pixel herauszuziehen. Daher ist die entwickelte Version mit einem Vakuumgreifer ausgestattet worden.

## Automatisierte Überwachung

Des Weiteren werden die Auswirkungen des Einstellens auf die benachbarten Pixel nicht automatisch erfasst. Analyse und Korrektur sind nicht integrativer Bestandteil der Prozesskette. Das Fehlerpotential ist bei dieser Art der Produktion aber schwer vorhersehbar und nicht mehr kalkulierbar. Die möglichen Auswirkungen reichen von einer leichten aber dennoch unerwünschten geometrischen Abweichung des produzierten Bauteils, können aber auch deutlich gravierender in Form einer Ausschussproduktion oder auch einer Beschädigung des Schaltisches auftreten.

Die Erkennung einer fehlerhaften Einstellung erfolgt durch den Maschinenwart, der den Prozess in einem solchen Fall abbrechen würde, die fehlerhafte Einstellung händisch zurückstellen und den Code an einer früheren Stelle wieder starten würde. Der Prozess ist somit von der Aufmerksamkeit und der Judiz einer Person abhängig. Um mit frei definierbaren aber fixierten Toleranzen arbeiten zu können und eine direkte automatische Reaktion der Maschine selbst zu ermöglichen, wurde in dem neuen Endeffektor ein optischer Sensor integriert.

## Vakuumgreifer

Das pneumatische System zur Speisung des Roboters erlaubt das Nutzen der vorhandenen Druckluft zur Ansteuerung des Vakuumgreifers. Ein Ejektor nutzt das Venturi-Prinzip, um die Druckluft in Unterdruck umzuwandeln und bedient damit einen Sauggreifer an der Spitze des Endeffektors. Dieser wird über digitale Signale gesteuert und erlaubt somit ein präzises Nachjustieren der Einstellungen.

#### Sensor

Bei dem verwendeten Sensor handelt es sich um einen Sharp GP2D12 Infrarot Entfernungssensor mit einem Messbereich von 10cm – 80cm. Die Anforderungen an die Messgenauigkeit (diese müsste bei der realen Anwendung

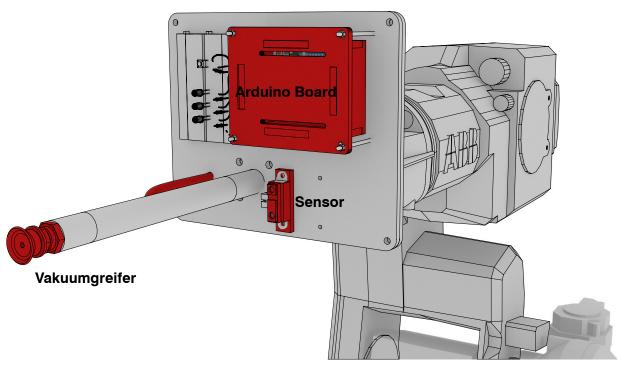


Abb. 5.2-2: Konzept des weiterentwickelten Verschiebetools

<±0.25mm deutlich unterschreiten, bei einer Messdistanz von ca. 300mm), können von diesem Sensor (Messgenauigkeit ~±5.0mm nicht erfüllt werden Dieser Sensor wurde aus Kostengründen verwendet, ist aber ausreichend, um das postulierte Prinzip zu veranschaulichen und den Nachweis der Funktionsfähigkeit des neuen Ansteuerungsscriptes zu erbringen.

Kommunikation Arduino Board/IRC5 Controller Die Information des Sensors wird von einem Arduino© Board, einem im Einzelhandel erhältlichen mit digitalen und analogen Ein- und Ausgängen versehenen Mikrocontroller, verarbeitet. Dieser Mikrocontroller ist über eine digitale Schnittstelle der DSQC 652 I/O Unit mit dem IRC5 Controller, der Steuerungseinheit des ABB IRB 140 Industrieroboters verbunden.

Die vom Arduino© Board bereitgestellte Spannung von 5 Volt korrespondiert nicht mit dem Stromkreis des Controller der 12 Volt benötigt, und kann aufgrund der geringen Stromstärke von nur 20 Milliampere auch über einen Spannungsregler nicht angepasst werden. Damit das gesendete Signal vom Controller auch empfangen wird, wird das digitale Signal zur Schaltung eines zwischengeschalteten Relais genutzt, und darüber die interne Spannungsversorgung des Controllers geschaltet, und damit die Kommunikation der beiden Systeme ermöglicht.

Funktionsweise und Maschinencode (Abb. 5.2-3 bis -6)

Der neu erstellte Maschinencode referenziert auf das ursprüngliche Einstellungskonzept (siehe Kapitel 2.2). Die Einstellungsprozedur wird nur an wenigen Stellen abgeändert und ergänzt. An dem grundsätzlichen Werkzeugpfad ändert sich nur die Einstellungsrichtung. War sie im ursprünglichen Code in S-Kurven angelegt, erfolgt die Einstellung der Pixelreihen ausschließlich von links nach rechts. Dies ist der rechtsseitigen Anordnung des Sensors geschuldet, der bei einer Einstellungsreihenfolge von links nach rechts, in der Warteposition zur Einstellung des nächsten Pixels, die Distanzmessung vornehmen kann. Ist eine zusätzliche Einstellungsrichtung von rechts nach links gefordert, könnte der Endeffektor durch Rückstellung um zwei Pixel, Drehung um 180°, oder durch einen auf der linken Seite baugleichen Scanner reagieren.

Das Kontrollkonzept sieht vor, dass jeder eingestellte Pixel (P0) auf die Einstellung kontrolliert werden muss, nachdem auch sein nachfolgender Nachbar (P1) eingestellt wurde. Nur so kann

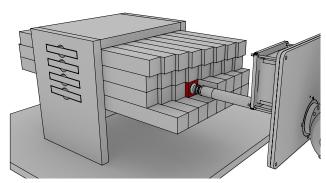


Abb. 5.2-3: Einstellung des Pixelfeldes

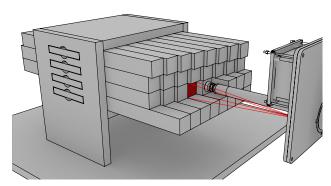


Abb. 5.2-4: Detektion eines mitverschobenen Nachbarpixels bei der routinemäßigen Kontrolle

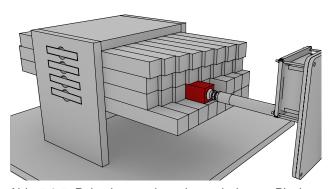


Abb. 5.2-5: Rejustierung des mitverschobenen Pixels

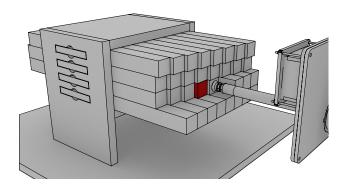


Abb. 5.2-6: Fortführung des Einstellungsprozesses

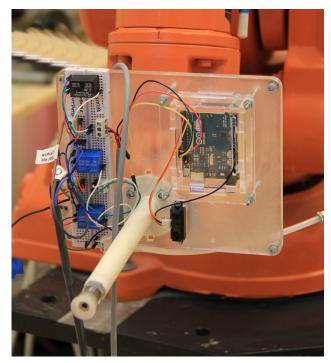


Abb. 5.2-7: Prototyp des weiterentwickelten Verschiebetools

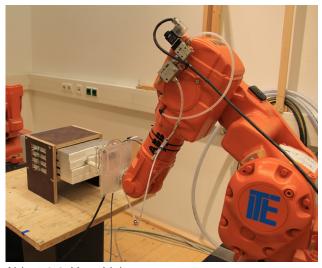


Abb. 5.2-8: Verschiebeprozess gesamt..

ein Verschieben, eben durch diesen Nachbarn ausgeschlossen werden.

Die ursprüngliche Offsetposition (O1) wird zur Scanposition. Ist diese Position erreicht, sendet der Controller ein digitales Signal an das Arduino Board, dass die Messung aktiviert. Ist die Messung erfolgt, wird erst ein Signal über den Erfolg der Messung gesendet und dann die Entscheidung "Weiterfahren" oder "Nachjustieren" getroffen. Ist das Ergebnis positiv, also die Einstellung im Rahmen der vorgegeben Toleranzen, läuft das Programm an gleicher Stelle weiter. Ist der Pixel mitverschoben worden, wird vom Programm eine Routine zur Rejustierung aufgerufen.

#### Nutzbarkeit

So angelegt ist das System in der Lage mit einem sehr simplen Kontrollmechanismus die Messungen im Fabrikationsprozess integriert und mit geringer Zeitverzögerung auszuführen. Die Versorgung des Endeffektors erfolgt abgesehen von einer Stromguelle des Aduino© Boards über die vorhandenen Druckluft- und Spannungsquellen des Robotersystems selbst. Es ist nur ein kurzes Abstoppen zum Schalten der Signale erforderlich. Der Zeitaufwand vergrößert sich nur gering. Der Aufbau dieser Methode ist allerdings nur für sehr verlässliche Systeme effizient einsetzbar: Muss man beispielsweise aufgrund von Neukonfiguration des Pixelfeldes, Alterung der Materialien oder schwankenden Umgebungsbedingungen von einer höheren Anzahl von Fehleinstellungen bei Nachbarpixeln ausgehen, wird diese Form der Korrektur schnell zu zeitaufwändig werden, um das Einstellungssystem adäguat abzusichern.

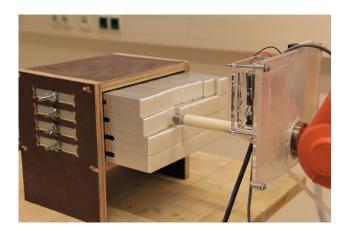
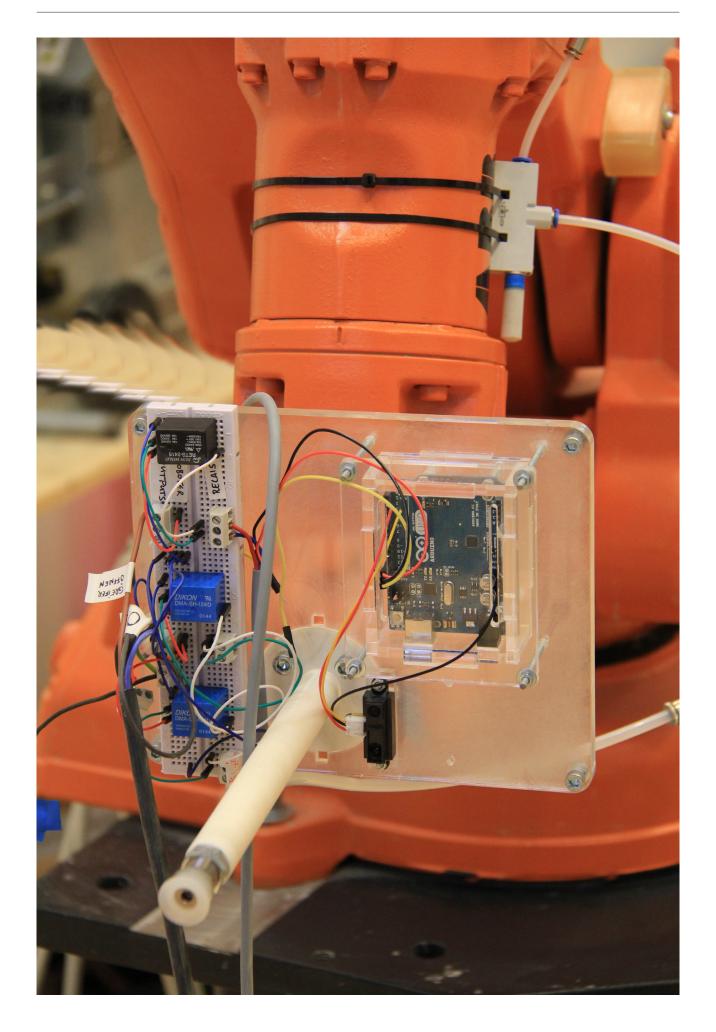
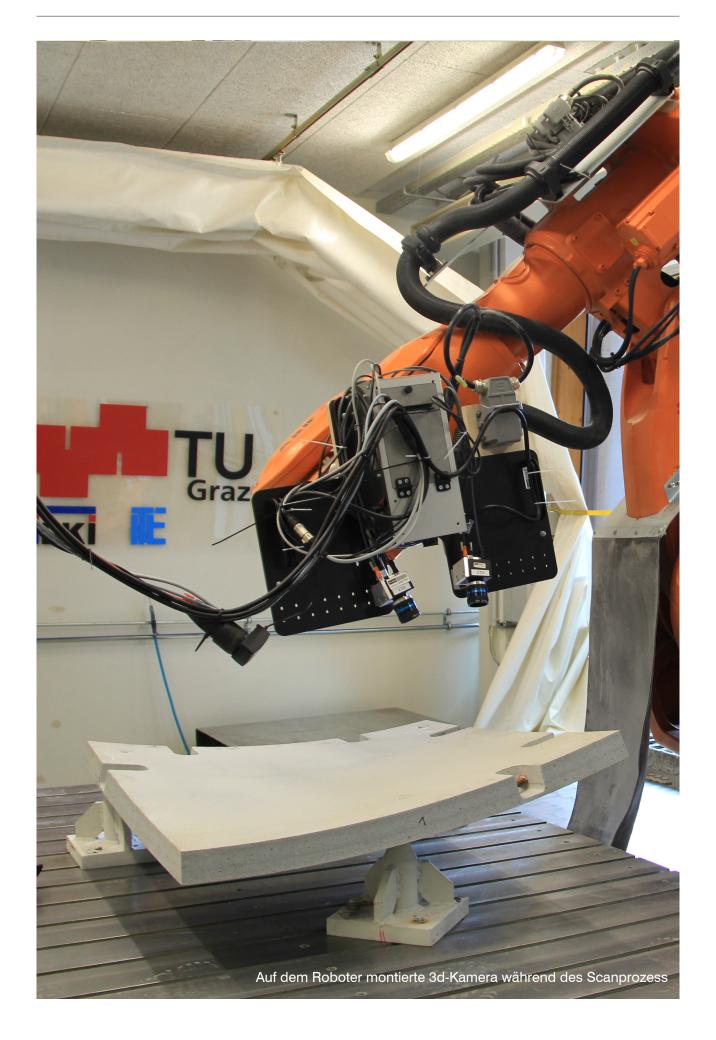


Abb. 5.2-9: und im Detail





# 5 Sensory Parametrics

## 5.3 Robotergestützte Messverfahren

## **Einleitung und Relevanz**

Der in diesem Kapitel beschriebene Versuch untersucht die Möglichkeit der Automatisierung des Scanprozesses. Die grundsätzlich erfolgreich verlaufene Versuchsreihe mit dem verwendeten System des Romer© Messarms hat aber auch Einschränkungen im System offengelegt und somit die Fragestellung nach einem automatisierten und im Fabrikationsprozess integrierten Scanprozess aufgeworfen.

### Handhabung

Der Scanprozess mit dem verwendeten Messarm hat die geometrischen Grenzen des Gerätes aufgezeigt. Die großflächige fehlerfreie Erfassung des Bauteils ist zeitintensiv und bedingt große Sorgfalt. Die Erfassungssbreite des Lasersystems von >85mm, der genau einzuhaltenden Fokus, die Orientierung des Scanners normal zur Oberfläche und die maximalen Auslenkungen des Messarms sind nur einige Faktoren, die den Zeitaufwand für eine komplette Erfassung eines Bauteils auf über 1 Stunde anwachsen lassen. Die zu erfassenden Bauteile sind in einem Schritt nicht mehr zu erfassen, und müssen daher immer wieder neu positioniert werden. Diese Arbeit ist naturgemäß eine Quelle für zusätzliche Abweichungen.

### Messabweichungen

Auch ein Teil der Messabweichungen resultieren aus der digitalen Aufbereitung (siehe Kapitel 4.1). Das Zusammenfügen mehrerer Scans zu einem digitalen Modell, die Orientierung dieses Modell und weitere Abweichungen, die während des Scanprozesses, seiner Vorbereitung und Auswertung entstehen, haben aufgezeigt, dass hier Potenzial zur Verbesserung der Messgenauigkeit besteht. Dies ist vor allem im Zuge der noch nicht genau definierten Anforderungen an die Maß- und Formgenauigkeit der Kontaktflächen relevant.

Nicht allein die Abmessungen, sondern auch die Position des Werkstücks relativ zur bearbeitenden Werkzeug sind für seine weitere Bearbeitung von Bedeutung. Daher wurde die Orientierung des Werkstücks über die Aussparungen der Referenzpixel und den korrespondierenden Aufspannbolzen auf dem Aufspanntisch vorgenommen. Die Platten werden aufgelegt und die Kugeln der Aufspannbolzen sinken in die Aussparungen der Betonelemente ein. Die genauen Werkstückabmessungen sind zu diesem Zeitpunkt aufgrund der im Herstellungsprozess auftretenden Abweichungen oder auch der händisch verlegten Randabschalung nicht bekannt.

Potentielle Fertigungsungenauigkeiten im Bereich der Referenzkegel werden nicht kontrolliert. Besonders in diesem Bereich haben Abweichungen aber signifikante Auswirkung auf die Orientierung.

## Wechselwirkung von Werkzeug und Werkstück

Die Analysen der Messergebnisse haben ergeben, dass es im Fabrikationsprozess des Formatschleifens der Kontaktflächen zu Abweichungen kommt, die als deutlich ungünstiger zu bewerten sind als die grundsätzlich erreichbaren Genauigkeiten der Anlage. Deren Ursachen sind mannigfaltig und nicht ausschließlich in der Kinematik oder Steifigkeit der Roboteranlage zu finden. Die Werkzeugpfade für die abschließende Bearbeitung referenzierten auf das digitale Modell. Abweichungen, die während der Herstellung der zu schleifenden Bauteile auftraten, wurden nicht mehr wahrgenommen.

Die Orientierung der zur Schleifbearbeitung aufgespannten Werkstücke oder der Schleifkörperverschleiß während der Fertigung sind zwei mögliche Ursachen von Abweichungen in der Fertigung. Der Fertigungsprozess der Kontaktflächen durch das Abschleifen des überschüssigen Materials mit einem diamantbesetzen Schleifstift ist unter den gegeben Bedingungen die gewählte Verfahrensweise zur Erlangung der geforderten Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität. Vorversuche ha-



Abb. 5.3-1: Bearbeitungsmethode Wasserstrahlschnitt

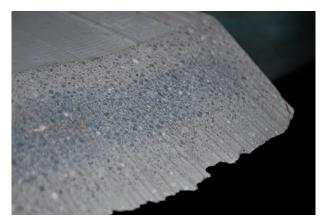


Abb. 5.3-2: Ergebnis des Wasserstrahlschnitt (klar sichtbare Auskegelungen auf der Austrittsseite)



Abb. 5.3-3: Bearbeitungsmethode Nassschleifen

ben die Möglichkeit des Wasserstrahlschnitts zur Fertigung untersucht (Abb. 5.3-1). Diese Methode eignet sich aufgrund des Auskegelns des Schnittbildes auf der Austrittsseite des Wasserstrahls bei zunehmender Bauteildicke (ca. 1.0-1.5mm bei einer Bauteilstärke von 50mm, Abb. 5.3-2) aber nur für einen Vorarbeitsgang den Roughcut. Der letzte Schliff muss über das Nassschleifen erfolgen, soll die Auflagefläche der Kontaktflächen maximiert werden (siehe Abb. 5.3-3).

Die gewählte Materialkombination aus UHPC und den beigemengten Kurzschnittfasern aus Stahl, stellen an das zerspanende Werkzeug aber grundsätzlich unterschiedliche Anforderung an das Material als auch die Schneidgeometrie.

In der Folge ist bei den gewählten Schleifstiften die Standzeit so gering, dass schon nach wenigen Arbeitsgängen, während der Fertigung einer einzigen Platte, eine im Rahmen der gewünschten Toleranzen signifikante Maßänderung des Werkzeugdurchmessers bedacht werden muss.

Diese Auswirkung auf das Werkzeug ist in ihrer Ausprägung zusätzlich noch von der lokalen Faserverteilung und -ausrichtung abhängig und daher nicht verlässlich vorherbestimmbar.

Gleiches gilt für den Einfluss auf die Steifigkeit des Systems. In den Bereichen mir erhöhtem Stahlfasergehalt ist auch von einem Anwachsen des Schnittdrucks auszugehen, was zu zusätzlichen Abweichungen des Werkzeugpfades führen kann.

Übliche Kombination aus Fertigung und Messverfahren und Adaption

Ist wie im aktuellen Fall die abschließende Werkstückgeometrie eines Bearbeitungsschrittes nicht eindeutig in den geforderten Toleranzen vorherzusehen, gibt es verschiedene Ansätze die Fertigungsgenauigkeit, durch Messungen als eingefügten Zwischenschritt, zu erhöhen. Die Kontrolle der Werkzeuggeometrie erfolgt durch Messschnitte, also der Messung eines bearbeiteten Musterstücks oder des Werkstücks, nicht des Werkzeugs. Über die Werkstückmaße können die Veränderung der Werkzeuggeometrie erkannt, und diese bei der weiteren Bearbeitung berücksichtigt werden.

Ein schon für die weitere Betrachtung von Produktionsprozessen gewichtiger Umstand zeigt sich hier:

Der in der Massenproduktion übliche Feed Forward Prozess, eine Abarbeitung des Werkstück

ohne individuelle Informationsparameter zwischen zwei verschiedenen Fertigungsschritten wird aufgebrochen und durch den Wechsel zwischen Messung und Fertigung. zu einem zyklischen sensorgestützten Feedback-Prozess, Die Fertigung eines Bauteils wird iterativ, die finale Form in annähernden Fabrikationszyklen erreicht.

## **Entwicklung, Funktion und Prototyp**

Lösungsansatz robotergestützte Messverfahren

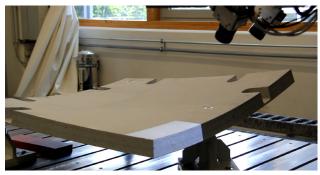
#### Versuchsbeschreibung

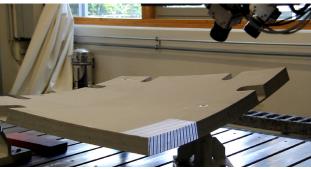
In Zusammenarbeit mit dem Institut für maschinelles Sehen und Darstellen (ICG) wurde ein dort entwickeltes optisches Scan-System auf dem Industrieroboter montiert und zu einer erneuten Vermessung des Schalenelements 01 genutzt. Parallel wurde noch einmal eine Kontrollmessung mit dem Messarm des inzwischen schon einmal verbauten Bauteils durchgeführt (S.198-199). Das Werkstück wurde dazu wieder auf dem Aufspanntisch der Roboteranlage platziert. Das Scansystem bestehend aus einem Projektor und zwei Kameras wurde über eine dafür gefertigte Adapterplatte auf dem Industrieroboter montiert und wie jedes andere Werkzeug als Endeffektor definiert. Der eingestellte Fokus der Kamera bildet den Tool Center Point des Werkzeugs.

#### Funktionsweise Kamera

Das verwendete Kamera-System funktioniert nach dem Structured Light Prinzip. Bei diesem Verfahren werden von einem Projektor eine Anzahl verschieden gerasterter Bilder (im verwendeten Fall 36 unterschiedliche Muster) auf das zu erfassende Objekt projiziert (Abb.5.3-4). Diese Bildersequenz wird von zwei Kameras, die in diesem Fall rechts und links neben dem Projektor montierten sind, erfasst (Abb. 5.3-5).

Durch Triangulation referenzierend auf den Kamerareferenzpunkt der jeweiligen Aufnahmen kann die x, y und z-Koordinate relativ zum Kamerasystem ermittelt werden, und aus diesen Daten eine Punktwolke und damit auch ein Objekt generiert werden. Dieses System erlaubt überaus präzise Messungen mit einer möglichen Messgenauigkeit von bis zu 0.01mm. Die Genauigkeit ist allerdings von dem Messabstand abhängig und beträgt 0.01mm bei einem Abstand von 100mm und noch ca. 0.088mm bei dem gewählten Abstand von 400mm. Dieser Abstand muss relativ genau (ca. ±50mm) eingehalten werden, da die Kameras auf diesen Abstand fokussiert sind. Die Auflösung der Ka-





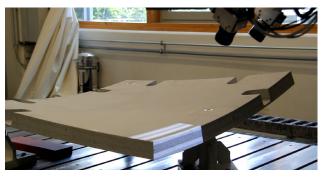


Abb. 5.3-4: Verschiedene Rasterungen des Structured Light Prinzips (Scansystems, ICG)

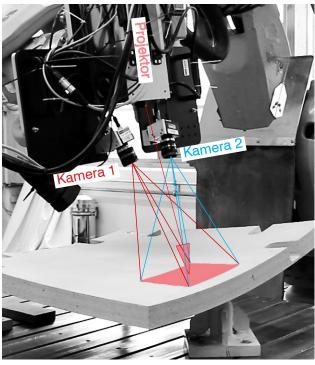


Abb. 5.3-5: Funktionsweise des Scansystems (ICG)

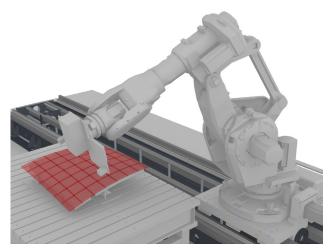


Abb. 5.3-6: Überlagernde Scans zur Erfassung der gesamten Oberseite des Schalenelements

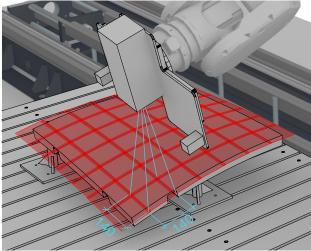


Abb. 5.3-7: Festlegung des Scanabstands auf 125mm aufgrund der Aufnahmengröße von 140x140mm

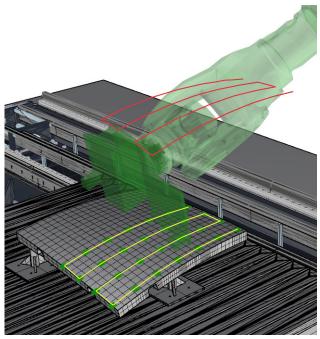


Abb. 5.3-8: Werkzeugpfadberechung über TCP (gelb) und Endeffektor 0 (rot)

meras beträgt 2000 x 2000 Pixel, die Aufnahmegröße liegt bei dem gewählten Abstand bei ca. 140 x 140mm. Daraus ergibt sich ein Rasterabstand zwischen den Punkten von ~0.07mm.

## Messprozedur und Werkzeugpfad

Um das gesamte Objekt zu erfassen und abzubilden, muss also eine Anzahl von Aufnahmen aus verschiedenen Positionen erfolgen. Diese werden durch Überlagerung, ähnlich der Best-Fit Methode zusammengesetzt und das Gesamtmodell generiert (Abb. 5.3-6). Damit es genug überlagernde Fläche zwischen den einzelnen Aufnahmen gibt und nicht erfasste Bereiche auszuschließen sind, wurde der Achsabstand zwischen den Aufnahmen auf 125mm festgelegt (Abb. 5.3-7).

Angepasst auf diese Spezifikationen wurde ein Script zur Erstellung eines Werkzeugpfades erstellt. Dazu wird ein quadratisches Punktraster erzeugt und auf die zu erfassenden Flächen projiziert, die Flächennormale an diesem Punkt ermittelt und somit die sich mit dem Toolcenterpoints überlagernden Targets für den Werkzeugpfad ermittelt.

Damit das Berechnungsprogramm des ICG diese Einzelaufnahmen zu einem Gesamtmodell zusammenfassen kann, wird die Position und Ausrichtung des Kamerareferenzpunktes zum jeweiligen Aufnahmezeitpunkt benötigt. Um diese direkt und verlustfrei aus dem Ansteuerungscode zu erhalten, muss das bis zu diesem Punkt mit den bisherigen Ansteuerungsprogrammen grundsätzlich idente Script abgeändert werden. Die Informationen die der Inverse Kinematics Solver benötigt um die Achsstellung des Roboters zu berechnen, beziehen sich auf die Relation des als TCP definierten Fokus und der Roboterbasis. Um diese in der Codeausgabe aber auf den Kamerareferenzpunkt (dieser ist mit dem Mittelpunkt des Endpunktes der sechsten Achse ident) beziehen zu lassen, werden die Achsstellungen des IK-Solvers ausgelesen und in einen Forward Kinematics Solver geladen. Dieser FK-Solver erstellt nun aus den Achsstellungen neue Targets, die sich mit dem Endeffektor x=0, y=0, z=0 überlagern. In der Folge wird eine exakt gleiche Bewegung vom Roboter ohne Werkzeug wie mit Werkzeug ausgeführt. Die Berechnung ist nach wie vor über den IK-Solver mit dem Werkzeugmittelpunkt erfolgt. Die im Code ausgegebene Position und Orientierung erfolgt über die Angabe: Endeffektor x=0, y=0, z=0 und überlagert sich dadurch mit dem Kamerareferenzpunkt (Abb. 5.3-8).

## Messergebnisse und Analyse

Das vom Messarm erfasste und das vom ICG 3d-Scanner erstellte Modell wurden in einem abschließenden Versuch im Programm Geomagic Control miteinander verglichen. Dazu wurden beide Modelle in ihrer Auflösung auf 10 Millionen Pixel reduziert und als Test und Referenz einander gegenübergestellt.

Das Ergebnis des Scans weist eine Genauigkeit von über 99%  $<\pm0.25$ mm auf (S. 198-199). Das genutzte System funktioniert im Rahmen der geforderten Toleranzen einwandfrei und bietet sich als alternatives Messverfahren an.

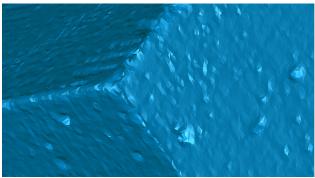
#### Auflösung und Qualität

Das von der Kamera des ICG erstellte und der Software zusammengesetzte digitale Modell erscheint in der angewendeten Auflösung dem mit dem Messarm erstellten Model gleichwertig. Weiter fällt positiv auf, dass es keine Fehlstellen gibt. Der Gesamteindruck ist noch homogener und vor allem das Zusammensetzten der 182 Scans funktioniert augenscheinlich noch exakter als das händische Zusammensetzen von nur zwei Scans, der Seite 3p und Offset, die mittels der erstellt Geomagic Control Software vereinigt wurden. Dies wird an den Kanten besonders deutlich. Fehlstellen und Abweichungen sind hier beim händischen Ausrichten und Zusammensetzen noch deutlich höher, als bei der automatisierten Datenerfassung (Abb. 5.3-9).

#### Einbindung in die Fabrikation

Dass die Orientierung des Modells auf den Roboter referenziert und somit die Position für weitere Bearbeitungsschritte herangezogen werden kann, prädestiniert diese Art des Scannens für die gewünschte Fertigungsfolge eines iterativen Fertigungsprozess (Abb. 5.3-10). In abwechselnden Zyklen könnte so die Auswirkung des Schleifprozesses auf das Werkstück abgeglichen werden. Im Resultat wäre eine höhere Fertigungsgenauigkeit zu erwarten.

Eine Folge der hohen Auflösung ist die große Datenmenge, die verarbeitet werden muss. Insgesamt besteht der Scan aus 182 Positionen, von denen je 36 gerasterte Aufnahmen erstellt wurden, was einer Gesamtanzahl von 6552 Aufnahmen entspricht. Die Gesamtdatenmenge des gesammelten Scans betrug vor der Erstellung des 3d-Modells über 70 Gigabyte, die daraus erstellte .obj-Datei noch 5 Gigabyte. Auch bei einer Reduktion auf das Messen zu bearbeitenden Kanten, wäre hier eine Reduktionsstrategie zu erwägen.



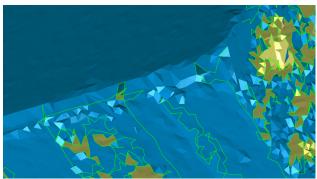
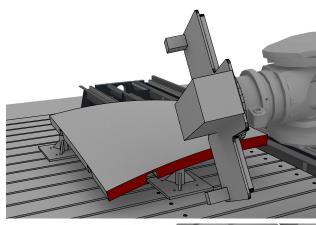


Abb. 5.3-9: Vergleich der Aufnahmequalität beim automatsierten Scan (System ICG, oben) und dem von Hand geführten Scan (Romer Messarm, unten)



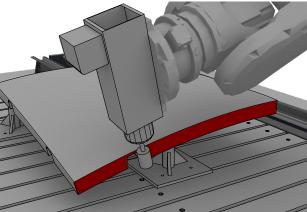
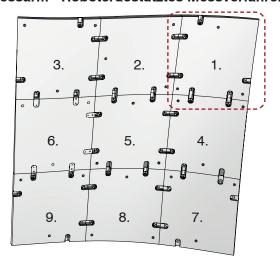
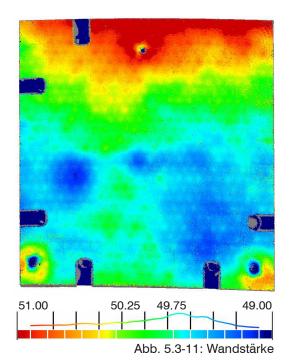


Abb. 5.3-10: Der zyklische Farbikationsprozess (Scannen - Schleifen) ermöglich iteratives Arbeiten und eine höhere Fertigungsgenauigkeit

## Vergleichsmessung Messarm - Robotergestütztes Messverfahren

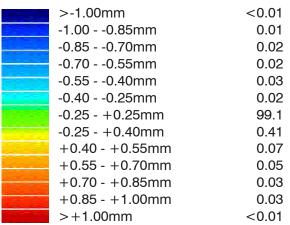




Messgenauigkeit	
Seite Offset	

in %

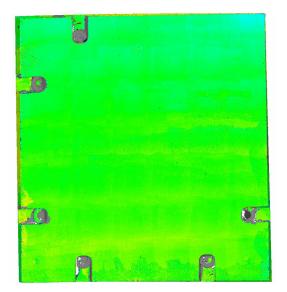
in %





## Messgenauigkeit Seite 3p

control op		
	>-1.00mm	< 0.01
	-1.000.85mm	< 0.01
	-0.850.70mm	< 0.01
	-0.700.55mm	< 0.01
	-0.550.40mm	0.01
	-0.400.25mm	0.38
	-0.25 - +0.25mm	99.2
	-0.25 - +0.40mm	0.23
	+0.40 - +0.55mm	0.12
	+0.55 - +0.70mm	< 0.01
	+0.70 - +0.85mm	< 0.01
	+0.85 - +1.00mm	< 0.01
	>+1.00mm	< 0.01



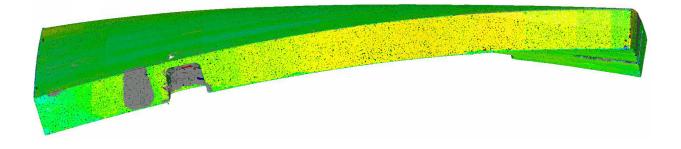


Abb. 5.3-12: Kontaktfläche hinten

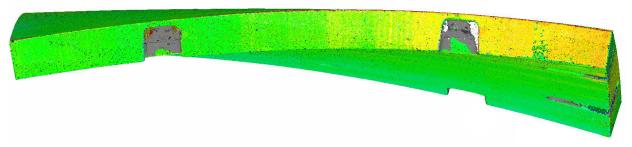
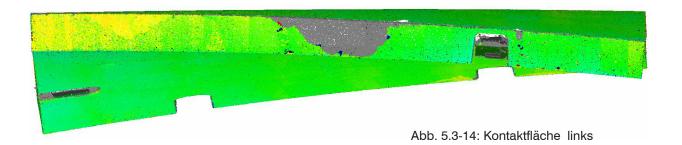


Abb. 5.3-13: Kontaktfläche vorne



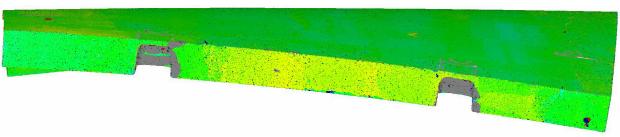
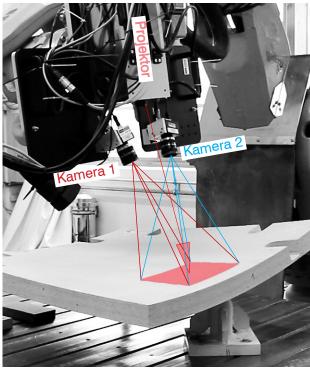


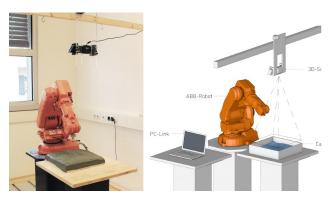
Abb. 5.3-15: Kontaktfläche rechts

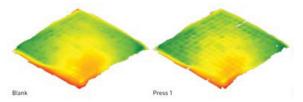


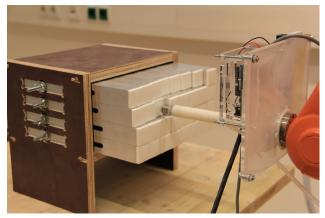


















# 5 Sensory Parametrics

## 5.4 Conclusio und Perspektive

#### Kontext

Das im Rahmen des FFG-Forschungsprojektes initiierte Projekt zur ressourcensparenden Herstellung doppeltgekrümmter Betonbauteile hat ein System hervorgebracht, dass von der Versatilität und der Präzision robotischer Systeme profitieren konnte. Neun unterschiedliche Schalenbauteile konnten in einer Prozesskette gefertigt werden, an deren Anfang und Ende der Ausführung der Industrieroboter steht. Sie wurden dabei in einer Genauigkeit gefertigt, die im Betonbau ein Novum darstellt und ein Kräfte übertragendes, trockenes und somit auch wieder lösbares Fügeprinzip ermöglicht.

Die gesamte Arbeit offeriert somit einen innovativen Ansatz zur Weiterentwicklung des Betonbaus und zur Revitalisierung des Schalenbaus, als auch zur grundsätzlichen Fabrikation von Bauteilen der Losgröße 1.

#### Dissertationsbeitrag

Im Rahmen dieser Dissertation konnte dazu mit der Entwicklung der parametrischen Programme zur Erstellung der notwendigen Maschinen-Codes, ein Beitrag zur Entwicklung des Produktionsprozesses geleistet, und die Ansteuerung des verwendeten Schalungsprototypen ermöglicht werden. Die vorgenommene Observation des gesamten Fabrikationsprozesses im 1/10 Millimeterbereich, hat die Quellen für Abweichungen von der ersten Einstellung bis zur abschließenden Formatierung der Bauteile erörtert und die erreichbaren Fertigungsgenauigkeiten quantifiziert.

Die in der Ursachenforschung hat bei der Analyse der digitalen Herstellungsprozesse gezeigt, dass die Produktion der Bauteile durch den Einsatz sensorischer Hilfsmittel automatisiert überwacht werden kann und somit auch Prozesse mit geringem Vorhersagepotential in niedrigen Losgrößen angewandt werden können. Erste Konzepte und Prototypen solcher "intelligenter Werkzeuge" konnten in ersten Versuchen entwickelt und getestet werden.

#### Ausblick

Das eingangs dieser Arbeit platzierte Zitat "Immer dann wenn sich die Produktionsmethoden der Architektur, verändern, verändert sich auch die Architektur"<sup>83</sup> soll an dieser Stelle noch einmal aufgegriffen werden.

Das im Rahmen dieser Arbeit präsentierte Bauprinzip ist unter der Fragestellung zur Nutzung von Industrierobotern entstanden und stellt einen neuen und eigenständigen Ansatz zum modernen Betonbau dar.

Die mittels Sensorik ermöglichte autonome Reaktionsfähigkeit der produzierenden Systeme, ist im Hinblick auf die Aufgabenstellungen in Architektur und Bauwesen, wie die Herstellung von effizienten Tragwerken und Freiformgeometrien, und daran gekoppelt die Fabrikation der individuellen Form in Losgröße 1, von hoher Relevanz. Die operativen Ziele der Forschungsförderungsgesellschaft werden in der Antragsvorlage zur "Produktion der Zukunft" mit "Effiziente Ressourcen- und Rohstoffnutzung sowie effiziente Produktionstechnologien", "Flexible Produktion" und "Herstellung hochwertiger Produkte"definiert<sup>84</sup>.

Diese Einbindung der sensorische Information, die auf der einen Seite zur Optimierung der Fabrikation dienen soll, kann aber auch einen relevanten kreativen Beitrag zur Entwicklung von Architektur und Design bieten. Erste begleitend durchgeführte und betreute Arbeiten dokumentieren diesen Schritt:

83 Ruby A, *Beyond Form* in Digital, real. Blobmeister: Erste gebaute Projekte/First Built Projects, Ausstellungskatalog, Frankfurt/M., Deutsches Architektur Museum (Hg.: ders.), Basel, Boston und Berlin, Birkhäuser (2001): 206-213. S.206 84 https://www.ffg.at/produktionderzukunft Zugriff: 20.03.2016

In seiner Diplomarbeit "Iterative Prozesse zur Herstellung von wiederverwendbaren Schalungsformen für doppelt gekrümmte Betonbauteile"<sup>85</sup> hat Florian Landsteiner einen 3d-Scanner über einem Plastelinblock platziert und somit die Fertigungsfolge von einer Ausgangs- in eine Zielgeometrie automatisch berechnen lassen. In Zyklen wurden die Arbeitsgänge überwacht und dementsprechend automatisiert nachjustiert.

Stefanie Lang hat in ihrer Diplomarbeit "Orthopädisch parametrisches Möbeldesign" die menschliche Anatomie, mittels eines hochauflösenden 3d-Scanners, genau erfasst und aufgrund dieser Daten die Sitzschalen einer Liege auf den Körper angepasst.

Pedja Gavrilovic hat im Rahmen des anlässlich der Rob | Arch 2014 abgehaltenen Workshops "Informal Material Formation" den Scan einer Anzahl von ausgelegten Kunststoffleisten ausgewertet und der Länge nach sortiert vom Roboter zu einer Säule stapeln lassen. Er hat dabei nur den Algorithmus festgelegt und nicht das Design selbst.

Und David Thomasson hat im Rahmen des selben Workshops der auf einem Roboter montierten Kamera durch Platzierung seines Finger über dem Objekt gezeigt, wo der Roboter ein definiertes Muster einpressen soll, und somit die formbildende Handlung eines Handwerkers oder Künstlers auf die Maschine übertragen.

Ob detaillierte Eingangsinformation, Prozessüberwachung oder Mensch-Maschine-Material Interaktion. Die Verknüpfung eines Roboters oder einer Maschine mit der Außenwelt, die Möglichkeit zur direkten Kommunikation mit dem Material, dem Werkzeug oder dem Nutzer, nützen nicht ausschließlich der Fabrikation, sondern bereichern auch die Möglichkeiten zu kreativen Handlungen und bringen das Konzept, den Gedanken des Architekten, Entwicklers oder Designers und seine Realisierung auf neuer Ebene zusammen.

Wenn es also stimmt, dass die Produktionsbedingungen die Architektur verändern, dann sollte die Architektur auch die Produktionsbedingungen verändern.

# **Appendix**

#### Literaturverzeichnis

#### **Buch und Printmedien**

Amtsberg, Felix, et al. "From Analysis to Production and Back Attempts and Results of Reusable Adaptive Freeform Production Strategies for Double Curved Concrete Construction Elements." Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016. Springer International Publishing, 2016. 304-315.

Amtsberg, F. E. L. I. X., F. E. L. I. X. Raspall, and A. N. D. R. E. A. S. Trummer. "Digital-Material Feedback in Architectural Design." Proceedings of the CAADRIA Conference, Daegu, South Korea. 2015.

Bechthold, Martin. "The return of the future: a second go at robotic construction." Architectural Design 80.4 (2010): 116-121.

Bechthold, Martin, and Nathan King. "Design robotics." Rob| Arch 2012. Springer Vienna, 2013. 118-130.

Block, Philippe, et al. Faustformel Tragwerksentwurf. DVA, 2015.

Chilton, John, Angus Macdonald, and Remo Pedreschi. "Chapter Eight Influence of Heinz Isler's work and the future of thin concrete shells." The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture: Heinz Isler. Thomas Telford Publishing, 2000. 155-159.

Faber, Colin. Candela und seine Schalen. Verlag Georg DW Callwey, 1965.

Gramazio, Fabio, and Matthias Kohler. Digital materiality in architecture. Baden: Lars Müller Publishers, 2008.

Greco, Claudio, and Pier Luigi Nervi. Pier Luigi Nervi: von den ersten Patenten bis zur Ausstellungshalle in Turin 1917-1948. Quart-Verlag, 2008.

Herzog, Thomas, and José Luis Moro. "Zum Werk von Félix Candela." ARCUS 18 (1992).

Isler, Heinz. Heinz Isler, Schalen: Katalog zur Ausstellung. Eds. Ekkehard Ramm, and Eberhard Schunck. Vdf, Hochschulverlag AG an der ETH, 2002.

Isler, Heinz *Moderner Schalen gebaut* Arcus, Architektur und Wissenschaft Nr. 18, Zum Werk von Felix Candela Nr. 18, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 1992, Köln

Johns, Ryan Luke, and Nicholas Foley. "Bandsawn Bands." Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014. Springer International Publishing, 2014. 17-32.

King, Nathan, et al. "Robotic tile placement: Tools, techniques and feasibility." Automation in Construction 39 (2014): 161-166.

Kok, M., et al. "Double-curved textile reinforced concrete panels with tensile strain-hardening characteristics." Proceedings of SHCC3-3rd International RILEM Conference on Strain Hardening Cementitious Composites, 3-5 November 2014, Dordrecht, The Netherlands. Delft University of Technology, 2014.

Krieg, Oliver, et al. "Performative Architectural Morphology Finger-Joined Plate Structures Integrating Robotic Manufacturing, Biological Principles and Location-Specific Requirements." Computational Design Modelling. Springer Berlin Heidelberg, 2011. 259-266.

Landsteiner Florian "Iterative Prozesse zur Herstellung von wiederverwendbaren Schalungsformen für doppelt gekrümmte Betonbauteile", Diplomarbeit am Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz, Oktober 2015

Lang Stefanie "Orthopädisch parametrisches Möbeldesign", Diplomarbeit am Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz, Febriuar

Lloret, Ena, et al. "Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication." Computer-Aided Design 60 (2015): 40-49.

Lynn, Greg, ed. Folding in architecture. Wiley-Academy, 2004.

Michel, Matthias, and Ulrich Knaack. "Grundlagen zur Entwicklung adaptiver Schalungssysteme für frei geformte Betonschalen und Wände." Bautechnik 91.12 (2014): 845-853.

Munro, Chris, and Daniel Walczyk. "Reconfigurable pin-type tooling: a survey of prior art and reduction to practice." Journal of manufacturing science and engineering 129.3 (2007): 551-565.

Nerdinger, W. "Wendepunkte im Bauen. Von der seriellen zur digitalen Architektur." Von der seriellen zur digitalen Architektur." Von der seriellen zur digitalen Architektur. (2010).

Oesterle, S., A. Vansteenkiste, and A. Mirjan. "Zero waste free-form formwork." Proceedings of the Second International Conference on Flexible Formwork, ICFF. CICM and University of Bath, Dept. of Architecture and Civil Engineering. Vol. 30. 2012.

Peck, Martin. "Atlas Moderner Betonbau." Konstruktion, Material, Nachhaltigkeit. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation (2013).

Peters, Stefan et al. "Schalentragwerke aus UHPC-Fertigteilen". Forschungsantrag 2012. Graz

Pius Flury: Die Suche nach der perfekten Schale. In: tec21, 49-50/2002

Raspall, Felix "Design with Material Uncertainty." Dissertation, 2015 Harvard University

Raun, Christian, and Poul Henning Kirkegaard. "Reconfigurable double-curved mould." Proceedings of the Second International Conference on Flexible Formwork. BRE CICM, University of Bath, 2012.

Reichel, Michael, Lutz Sparowitz, and Bernhard Freytag. "Wildbrücke Völkermarkt-vorgespanntes Bogentragwerk aus UHFB-Segmentfertigteilen." Beton-und Stahlbetonbau 106.11 (2011): 760-769.

Reichel, Michael, Lutz Sparowitz, and Bernhard Freytag. "Wildbrücke Völkermarkt-vorgespanntes Bogentragwerk aus UHFB-Segmentfertigteilen." Beton-und Stahlbetonbau 106.12 (2011): 827-835.

Ruby Andreras "Beyond Form Architektur im Zeitalter ihrer digitalen Produzierbarkeit", in: Digital, real. Blobmeister: Erste gebaute Projekte/First Built Projects, Ausstellungskatalog, Frankfurt/M., Deutsches Architektur Museum (Hg.: ders.), Basel, Boston und Berlin, Birkhäuser (2001): 206-213.

Rühle, Hermann Wie wurden Schalen gebaut Arcus, Architektur und Wissenschaft Nr. 18, Zum Werk von Felix Candela Nr. 18, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 1992, Köln

Schlaich, Jörg Rückblick und Ausschau auf das Berufsbild des Bauingenieurs: Ein Interview mit Jörg Schlaich aus dem Jahr 1999, in Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014)

Schipper, H. R. Double-curved precast concrete elements: Research into technical viability of the flexible mould method. Diss. TU Delft, Delft University of Technology, 2015.

Schwartz, Thibault, et al. "All Bent Out...." Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014. Springer International Publishing, 2014. 305-317.

Sobek, Werner. Auf pneumatisch gestützten Schalungen hergestellte Betonschalen. 1987.

Søndergaard, Asbjørn, et al. "Robotic Hot-Blade Cutting." Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016. Springer International Publishing, 2016. 150-164.

Trummer, Andreas, Felix Amtsberg, and Stefan Peters. "Mill to Fit." Rob| Arch 2012. Springer Vienna, 2013. 110-117.

Veenendaal, Diederik, and Philippe Block. "Design process for prototype concrete shells using a hybrid cable-net and fabric formwork." Engineering Structures 75 (2014): 39-50.

Veenendaal, Diederik, and Philippe Block. "Zwischen effizienter Konstruktion und expressivem Ausdruck, in Archithese 3 Archithese Verlagsgesellschaft mbH (2013): 38-43.

Wachsmann, Konrad. Wendepunkt im Bauen. Vol. 160. Krausskopf-Verlag, 1959.

Willmann, Jan, Matthias Kohler, and Fabio Gramazio. The robotic touch: How robots change architecture Park Books (2014)

#### Interview

Hadl, P. Interview geführt von Felix Amtsberg am 13.06.2016

Oesterle, S. Interview geführt von Felix Amtsberg am 12.10.2016

Santner, G. Interview geführt von Felix Amtsberg am 12.10.2016

#### Online

https://www.vdz-online.de/publikationen/betontechnische-berichte/ Zugriff: 12.09.2016

http://www.ktec.at/pdf/Kunsthaus\_Graz\_12.pdf, Zugriff: 20.09.2016

http://concrete-composite.cetongrc.com/wp-content/uploads/2013/06/WWW-2.11 Roca 2111 3.pdf, 10.09.2016

http://www.baunetzwissen.de/objektartikel/Beton-Roca-London-Gallery-in-London-GB\_2517847.html, Zugriff 10.09.2016

http://www.ndr.de/nachrichten/dossiers/elbphilharmonie/Elbphilharmonie-soll-789-Millionen-Euro-kosten,elbphilharmonie821.html Zugriff 10.09.2016

 $http://www.detail.de/artikel/massgeschneiderte-freiform-forschungsprojekt-tailorcrete-13453/\ Zugriff\ 10.9.2016$ 

http://www.hal-robotics.com/ Zugriff 20.09.2016

http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/index.html Zugriff 10.09.2016

http://www.design2production.ch/ Zugriff: 26.10.2016

http://www.binisystems.com/ Zugriff 05.09.2016

http://www.betonbau.tuwien.ac.at/forschung/aktuelle-forschungsprojekte/eine-betonkuppel-zum-aufblasen/ Zugriff: 05.09.2016

http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/164.html, Zugriff: 16.09.2016

http://adapa.dk/ Zugriff: 05.05.2016

http://research.gsd.harvard.edu/maps/portfolio/printing-ceramic-louvers/ Zugriff 08.08.2016

https://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjAg9uJ1vvPAhXJExoKHS IhDDUQFggjMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ktn.gv.at%2F287003\_DE&usg=AFQjCNHUMtL0qHDAJ-Pg-AR8cdy\_sLYkPg&bvm=bv.136811127,d.d2s&cad=rja S.12 Zugriff: 16.10.2016

http://at.foamglas.com/de/waermedaemmung/produkte/produktuebersicht/foamglas\_platten/ Zugriff 10.09.2016

http://hexagonmi.com/products/portable-measuring-arms/romer-absolute-arm-with-integrated-scanner, Zugriff: 14.05.2016

https://www.ffg.at/produktionderzukunft Zugriff: 20.03.2016

# **Appendix**

#### Bilderverzeichnis

- 1.1-1 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/05/Gartencenter\_Wyss\_Zuchwil\_02\_09.jpg, Zugriff 16.09.2016
- 1.1-2 images.adsttc.com/media/images/5349/3e7f/c07a/80f3/5100/0082/large\_jpg/LosManantiales1.jpg?1397309047 , Zugriff 16.09.2016
- 1.1-3 http://theredlist.com/media/database/architecture/sculpture1/pier-luigi-nervi-palazzetto-dello-sport/007-pier-luigi-nervi-palazzetto-dello-sport-theredlist.jpg , Zugriff 16.09.2016
- 1.1-4 http://c1038.r38.cf3.rackcdn.com/group5/building45079/media/jyai 2.jpg , Zugriff 16.09.2016
- 1.1-5 http://www.romberger.at/wp-content/uploads/2015/10/romberger-betonfertigteile-objektbau-DSC07165.jpg, Zugriff 16.09.2016
- 1.1-6 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf
- 1.1-7 http://glform.com/wp-content/uploads/2012/02/gallen 2-516x290.jpg, Zugriff 17.09.2016
- 1.1-8 http://glform.com/wp-content/uploads/2012/01/GALLEN\_1-516x344.jpg, Zugriff 17.09.2016
- 1.1-9 Silvia Amtsberg
- 1.1-10 Silvia Amtsberg
- 1.1-11 http://a2.images.divisare.com/image/upload/c\_fit,w\_720/f\_auto,q\_auto/v1/project\_images/2909587/The-Roca-Gallery-London-016.jpg Zugriff 20.09.2016
- 1.1-12 http://www.architektur-sichtbeton-3d-composite.de/produkte/ceton/roca-london-gallery-making-of/# Zugriff 20.09.2016
- 1.1-13 Ebd. Zugriff 20.09.2016
- 1.1-14 Ebd. Zugriff 20.09.2016
- 1.1-15 Ebd. Zugriff 20.09.2016
- 1.1-16 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf
- 1.1-17 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf
- 1.1-18 Moderner Betonbau Atlas S.110
- 1.1-19 Moderner Betonbau Atlas S.110
- 1.1-20 http://www.detail.de/fileadmin/ migrated/pics/tailorcrete-fsd-aarhus-04 01.jpg Zugriff 20.09.2016
- 1.1-21 Schipper, H.R: Double-curved precast concrete elements, S. 35
- 1.1-22 Raun, C. und Kirkegaard, P.H. Reconfigurabel double-curved mould in icff2012, S. 295
- 1.1-23 Ebd. S. 297
- 1.1-24 Oesterle, S., Vansteenkiste, A. und Mirjan, A. Zero Waste Free-Form Formwork in icff2012, S. 259
- 1.1-25 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf
- 1.1-26 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf
- 1.1-27 Gramazio, F. Kohler, M. und Wilmann, The Robotic Touch, S. 484 485
- 1.1-28 http://www.br2-publication.com/download/publications/magazines/ibr\_Ausgabe%2005%2006\_2011.pdf Zugriff: 20.09.2016
- 1.1-29 http://www.gramaziokohler.com/web/d/projekte/52.html Zugriff: 10.05.2010
- $1.1-30 \quad http://www.gramaziokohler.com//web/includes/popup.php?file=http://www.dfab.arch.ethz.ch/data/Projectl-mages/02_Web/M/036/061130_036_RenderingBuilding_TB_001_WM.jpg&Copyright=6&lang=d&closeText=click%20 to%20close Zugriff: 10.05.2010$
- $1.1-31 \quad http://www.gramaziokohler.com//web/includes/popup.php?file=http://www.dfab.arch.ethz.ch/data/Projectl-mages/02_Web/M/036/061130_036_RenderingBuilding_TB_001_WM.jpg&Copyright=6&lang=d&closeText=click%20 to%20close Zugriff: 20.09.2016$
- 1.1-32 http://research.gsd.harvard.edu/maps/files/2012/08/Robotic-Tile-Placement.pdf Zugriff: 20.09.2016
- 1.1-33 http://research.gsd.harvard.edu/maps/files/2012/08/Robotic-Tile-Placement.pdf Zugriff: 20.09.2016
- 1.1-34 http://research.gsd.harvard.edu/maps/files/2012/08/Robotic-Tile-Placement.pdf Zugriff: 20.09.2016
- 1.1-35 http://research.gsd.harvard.edu/maps/files/2012/08/Robotic-Tile-Placement.pdf Zugriff: 20.09.2016
- 1.1-36 http://icd.uni-stuttgart.de/wp-content/gallery/researchpavilion 2011 8/02 millingrange.jpg Zugriff 20.09.2016

- 1.1-37 http://icd.uni-stuttgart.de/wp-content/gallery/researchpavilion 2011 8/12 rh2028-0035.jpg Zugriff 20.09.2016
- 1.1-38 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf
- 1.1-39 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf
- 1.1-40 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf
- 1.2-1 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf

RobArch Bogen ausgestellt im Semperdepot, Wien Robert Schmid, Institut für Tragwerksentwurf

Adaptive Schalung, Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf

- 2.1-1 http://www.baunetzwissen.de/imgs/6/1/4/1/2/1a29b94c82eb5d9a.jpg Zugriff 23.09.2016
- 2.1-2 http://rubens.anu.edu.au/htdocs/laserdisk/0234/23481.JPG Zugriff 23.09.2016
- 2.1-3 https://fortunedotcom.files.wordpress.com/2015/10/gettyimages-5481292173.jpg?quality=80 Zugriff 23.09.2016
- 2.1-4 http://www.peri.co.mz/shared/references/img/14 merc benz lg.gif Zugriff 23.09.2016
- 2.1-5 Wendepunkte im Bauen Von der seriellen zur digitalen Architektur, S. 166
- 2.1-6 http://www.block.arch.ethz.ch/brg/images/cache/dsc-0369-ratio12\_1409911784\_960x540.jpg?1409911784 Zugriff 27.09.2016
- 2.1-7 http://www.block.arch.ethz.ch/brg/images/cache/dsc-0320-cropped\_1403168925\_960x540.jpg?1403168925 Zugriff 27.09.2016
- 2.1-8 http://www.betonbau.tuwien.ac.at/uploads/pics/Fertige Kuppel 04.jpg Zugriff 27.09.2016
- 2.1-9 http://www.binisystems.com/binishells.html Zugriff 27.09.2016
- 2.1-10 http://www.binisystems.com/binishells.html Zugriff 27.09.2016
- 2.1-11 http://www.binisystems.com/binishells.html Zugriff 27.09.2016
- 2.1-12 http://www.betonbau.tuwien.ac.at/uploads/pics/Schalung Bewehrung 04.jpg Zugriff 27.09.2016
- 2.1-13 http://www.betonbau.tuwien.ac.at/uploads/pics/Betonplatte\_vor\_Aufblasen\_02.jpg Zugriff 27.09.2016
- 2.1-14 http://www.betonbau.tuwien.ac.at/uploads/pics/Fertige\_Kuppel\_04.jpg Zugriff 27.09.2016
- 2.1-15 http://www.ebawe.de/sites/default/files/styles/popup/public/produktbilder/ebawe-elementdecken-02.

jpg?itok=92ltdKmjDsg Zugriff 27.09.2016

- 2.1-16 Pier Luigi Nervi Von den ersten Patenten bis zur Ausstellungshalle in Turin 1917-1948 S.184
- 2.1-17 Ebd. S. 187
- 2.1-18 Ebd. S. 274
- 2.1-19 Auf pneumatisch gestützten Schalungen hergestellte Betonschalen S. 31
- 2.1-20 Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016 S.150
- 2.1-21 https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/6f/38/d7/6f38d73174429fbf3d57d96119646612.jpg Zugriff 26.10.2016
- 2.1-22 http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02\_Web/M/083/131112\_083\_003WP4Actuation\_
- SA\_001\_WM.jpg Zugriff 27.09.2016
- SA 001 WM.jpg Zugriff 27.09.2016
- 2.1-24 http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02\_Web/M/083/131111\_083\_PrototypeDocumentation-Photos MikeLyrenmann 028 PS WM.jpg Zugriff 27.09.2016
- 2.1-25 http://adapa.dk/wp-content/uploads/2013/01/Adaptive-mould flat casting-sides.jpg Zugriff 27.09.2016
- 2.1-26 http://adapa.dk/wp-content/uploads/2013/01/Prepare 3 Material-340x215.jpg Zugriff 27.09.2016
- 2.1-27 http://adapa.dk/wp-content/uploads/2013/01/Curved Gypsum panel product.jpg Zugriff 27.09.2016
- 2.1-28 http://adapa.dk/wp-content/uploads/2013/01/Casting 3 Release-340x215.jpg Zugriff 27.09.2016
- 2.1-29 https://www.youtube.com/watch?v=alyxH5QwAME Zugriff 27.09.2016
- 2.1-30 https://www.voutube.com/watch?v=alvxH5QwAME Zugriff 27.09.2016
- 2.1-31 https://www.youtube.com/watch?v=alyxH5QwAME Zugriff 27.09.2016
- 2.1-32 https://www.youtube.com/watch?v=alyxH5QwAME Zugriff 27.09.2016
- 2.1-33 https://www.youtube.com/watch?v=alyxH5QwAME Zugriff 27.09.2016
- 2.1-34 Grundlagen zur Entwicklung adaptiver Schalungssysteme für frei geformte Betonschalen und Wände S. 848
- 2.1-35 Schipper, H.R: Double-curved precast concrete elements, S. 123
- 2.1-36 Freigeformte Betonfertigteile S. 176

- 2.2-1 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf 2.2-2 Robert Schmid, Institut für Tragwerksentwurf 2.2-3 - 2.2-8 Felix Amtsberg Institut für Tragwerksentwurf 2.2-9 Robert Schmid, Institut für Tragwerksentwurf 2.2-10 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf 2.2-11 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf 2.2-12 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf RobArch aus Schalumglas, Robert Schmid, Institut für Tragwerksentwurf 2.4-10 - 2.4-8 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf 2.3-1 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf 2.3-2 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf 2.3-3 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf 2.3-4 http://fertigteilwerk-rau.de/wp-content/uploads/2013/12/Treppen8.jpg Zugriff 01.10.2016 2.3-5 http://www.domusweb.it/content/dam/domusweb/it/dall-archivio/2011/04/28/il-palazzo-delle-esposizioni/ big 340924 3273 DNERVI 005 00041.jpg/jcr:content/renditions/cq5dam.web.1280.1280.jpeg Zugriff: 10.09.2016 http://nordirak-turabdin.de/wp-content/uploads/2011/07/190 steinbogen in salah kl1-e1318075215966.jpg Zugriff 01.10.2016 2.3-7 https://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiwrvvgrfrPAhWDMBo KHSa1DEMQFggjMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ktn.gv.at%2F287003 DE&usg=AFQjCNHUMtL0qHDAJ-Pg-AR8cdy sLYkPg&bvm=bv.136811127,d.d2s&cad=rja Zugriff: 26.09.2016 https://www.google.at/url?sa=t&rct=j&g=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiwrvvqrfrPAhWDMBo KHSa1DEMQFggjMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ktn.gv.at%2F287003 DE&usg=AFQjCNHUMtL0qHDAJ-Pg-AR8cdy sLYkPg&bvm=bv.136811127,d.d2s&cad=rja Zugriff: 26.09.2016 2.3-9 https://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiwrvvgrfrPAhWDMBo KHSa1DEMQFggjMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ktn.gv.at%2F287003 DE&usg=AFQjCNHUMtL0qHDAJ-Pg-AR8cdy sLYkPg&bvm=bv.136811127,d.d2s&cad=rja Zugriff: 26.09.2016 2.4-1 Andreas Trummer, Institut für Tragwerksentwurf 2.4-2 - 2.4-8 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf 2.4-3 Robert Schmid, Institut für Tragwerksentwurf 2.4-4 Robert Schrempf, Institut für Tragwerksentwurf 2.4-5 Robert Schmid, Institut für Tragwerksentwurf Mock Up Robert Schmid, Institut für Tragwerksentwurf 3.1-1 Gernot Parmann, Institut für Tragwerksentwurf 3.1-2 - 3.1.19 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf 3.1-20 Robert Schrempf, Institut für Tragwerksentwurf Taktile Erfassung des Pixelfeldes, Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf 4.1-1 - 4.1.22 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf 4.1-23 Gernot Parmann, Institut für Tragwerksentwurf 4.1-24 - 4.2-32 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf 4.1-33 Robert Schrempf, Institut für Tragwerksentwurf
- 4.1-34 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf
- 4.1-35 Robert Schrempf, Institut für Tragwerksentwurf
- 4.2 sämtliche Bilder und Grafiken von Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf
- 4.3 sämtliche Bilder und Grafiken von Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf
- 4.4-1 4.4-11 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf

- 4.4-12 Gernot Parmann, Institut für Tragwerksentwurf
- 4.4-13 Robert Schrempf, Institut für Tragwerksentwurf
- 4.4-14 4.4-27 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf

Sichtseite unten Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf

4.5 sämtliche Bilder und Grafiken von Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf

Kontaktflächen eines Randelementes, Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf

- 4.6-1 Robert Schrempf, Institut für Tragwerksentwurf
- 4.6-2 4.6-67 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf
- 4.7 sämtliche Bilder und Grafiken von Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf

Mock-Up bestehend aus neun Schalenelementen, Robert Schmid, Institut für Tragwerksentwurf

- 4.8-1 icff2012,Reconfigurable double-curved mould, S.298
- 4.8-2 icff 2012, Zero Waste Free-Form Formwork, S. 266
- 4.8-3 https://www.youtube.com/watch?v=alyxH5QwAME Zugriff 27.09.2016
- 4.8-4 Double-curved precast concrete elements Research into technical viability of the flexible mould method, S.158
- 4.8-5 4.8-35 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf
- 4.8-36 Gerhard Santner, Labor für konstruktiven Ingenieurbau
- 4.8-6 -4.8-43 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf

Scanprozess eines Schalenelementes, Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf

- 5.1-1 Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014, S.19
- 5.1-2 Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014, S.28
- 5.1-3 http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/includes/popup.php?projectId=216&Copyright=18&lang=d&Bilder Gezuegelt=1&image\_count=0&closeText=click%20to%20close Zugriff 19.10.2016
- 5.1-4 http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/includes/popup.php?projectId=216&Copyright=18&lang=d&Bil derGezuegelt=1&image count=2&closeText=click%20to%20close Zugriff 19.10.2016
- 5.1-5 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf
- 5.1-6 Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf
- 5.1-7 http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/includes/popup.php?projectId=206&Copyright=18&lang=d&Bilder Gezuegelt=1&image\_count=2&closeText=click%20to%20close
- 5.1-8 https://vimeo.com/104026018
- 5.1-9 http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/data/ProjectImages/02\_Web/M/134/140110\_134\_FlowerColumn\_EL\_003\_WM.jpg Zugriff: 26.10.2016

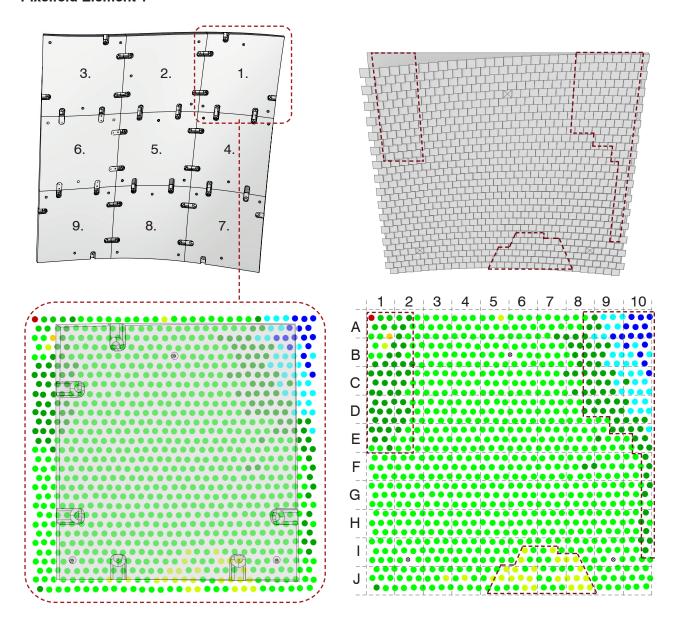
Sensorgestützter Einstellungsprozess eines Ausschnittmodells

- 5.2 sämtliche Bilder und Grafiken von Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf
- 5.3 sämtliche Bilder und Grafiken von Felix Amtsberg, Institut für Tragwerksentwurf

Begleitende Projekte unter Nutzung von Sensorik im robotischen Fabrikationsprozess, Bilder von Felix Amtsberg, Florian Landsteiner und Stefanie Lang

# **Appendix**

Einstellungsgenauigkeit des Pixelfeldes	216-224
Die Sandformen	227-235
Die Sichtflächen	236-253
Wiederholgenauigkeit	254-267
Die Kontaktflächen	270-303



Eingestellt in Reihenfolge: 8

**Einstellungsgenauigkeit:** 78,4% < +-0.25mm

# Nesterbildung ungenauer Einstellungen:

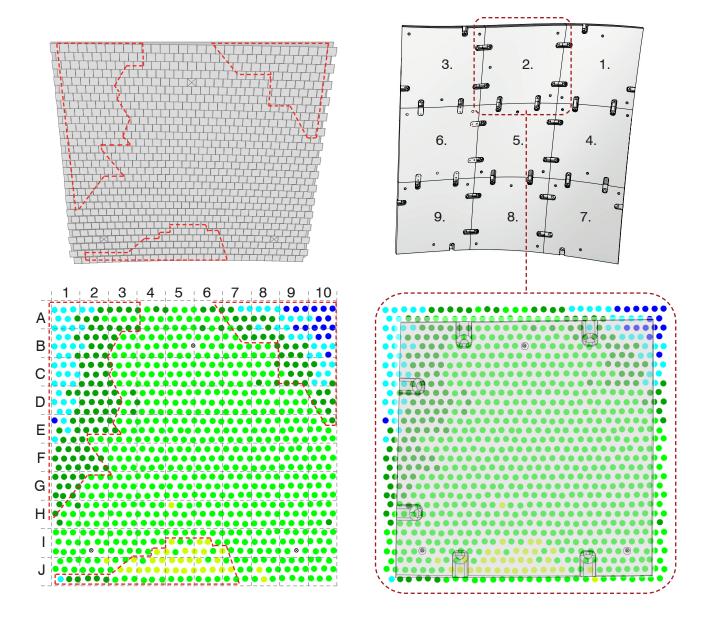
A1 - E2 ca. 70 Pixel 0.25mm -1.0mm zu hoch A8 - I10 ca. 100 Pixel 0.25mm -0.50mm zu hoch I5 - J8 ca. 25 Pixel 0.25-0.50mm zu gering

Maximale Einstellungstiefe: 148.0 mm

**Anmerkung:** Ein Pixel im Bereich A1 auf maximaler Einstellung. Die Einstellungsabweichungen nehmen im Bereich A1 - E2 verstärkt zu.

### gemessene Einstellung

Abweichung	Anzahl
>+1.50mm	X
+1.25 - +1.50mm	X
+1.00 - +1.25mm	1
+0.75 - +1.00mm	X
+0.50 - +0.75mm	X
+0.25 - +0.50mm	28
+0.250.25mm	717
-0.250.50mm	123
-0.500.75mm	33
-0.751.00mm	12
-1.001.25mm	1
-1.251.50m	X
>-1.50mm	X



### gemessene Einstellung

•	•		
Abweichung	An	zahl	
>+1.50mm	Х		
+1.25 - +1.50mm	X		
+1.00 - +1.25mm	X		
+0.75 - +1.00mm	X		
+0.50 - +0.75mm	X		
+0.25 - +0.50mm	34		
+0.250.25mm	645		
-0.250.50mm	155		
-0.500.75mm	64		
-0.751.00mm	17		
-1.001.25mm	X		
-1.251.50m	X		
>-1.50mm	X		

# **Eingestellt in Reihenfolge:** 9

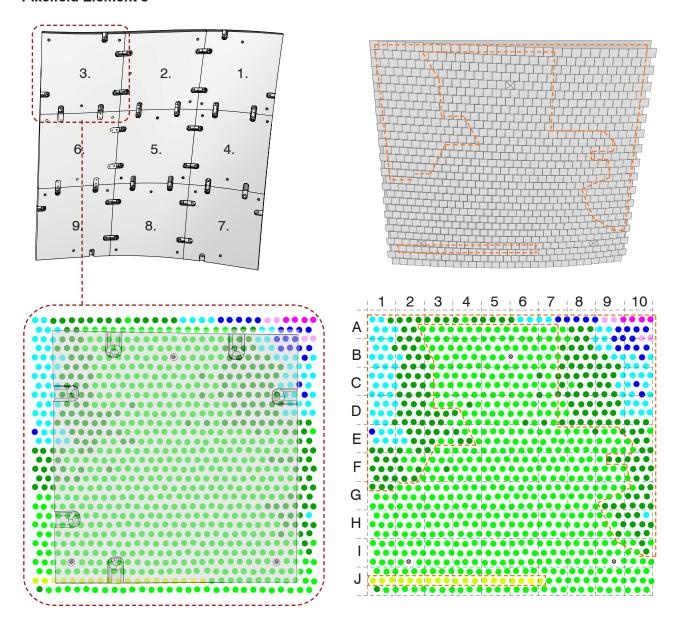
**Einstellungsgenauigkeit:** 70,5% < +-0.25mm

# Nesterbildung ungenauer Einstellungen:

A1 - H1 ca. 125 Pixel 0.25mm -0.75mm zu hoch A7 - E10 ca. 90 Pixel 0.25mm -1.00mm zu hoch J1 - I7 ca. 35 Pixel 0.25-0.50mm zu gering

Maximale Einstellungstiefe: 49.1 mm

**Anmerkung:** Die Einstellungsungenauigkeiten nehmen im Randbereich (A7 - E10), hier besonders im Bereich (A9 - A10) verstärkt zu.



Eingestellt in Reihenfolge: 1

Einstellungsgenauigkeit: 65,2% < +-0.25mm

### Nesterbildung ungenauer Einstellungen:

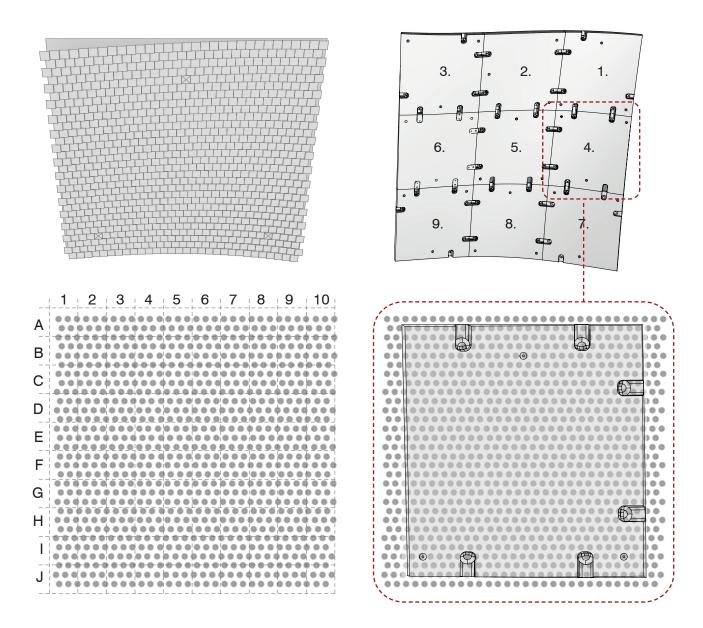
Oben links ca. 140 Pixel 0.25mm -0.75mm zu hoch Oben rechts ca. 160 Pixel 0.25mm -1.50mm zu hoch Unten Reihe 29 linear, leicht links ca. 20 Pixel 0.25-0.50mm zu gering

# Maximale Einstellungstiefe: 79.1 mm

**Anmerkung:** ungenaueste Einstellung, Pixeltisch im Nachhinein bearbeitet, Auffälligkeit von Reihe 29 (J1-J7) nicht mehr aufgetaucht.

### gemessene Einstellung

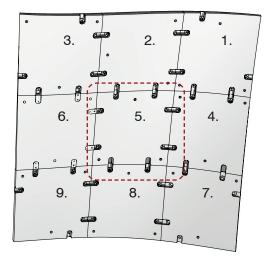
Abweichung	Anzahl
>+1.50mm	X
+1.25 - +1.50mm	X
+1.00 - +1.25mm	X
+0.75 - +1.00mm	X
+0.50 - +0.75mm	X
+0.25 - +0.50mm	18
+0.250.25mm	597
-0.250.50mm	196
-0.500.75mm	76
-0.751.00mm	13
-1.001.25mm	7
-1.251.50m	4
>-1.50mm	4

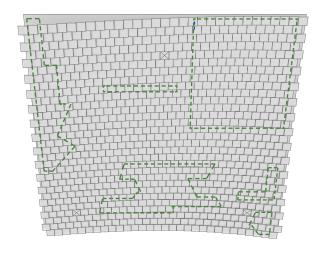


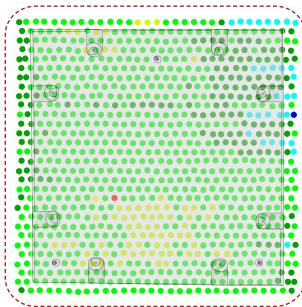
#### gemessene Einstellung

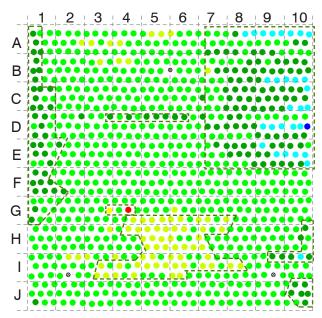
keine Messung druchgeführt

Maximale Einstellungstiefe: 144.4 mm









# Eingestellt in Reihenfolge: 3

**Einstellungsgenauigkeit:** 72,4% < +-0.25mm

### **Nesterbildung ungenauer Einstellungen:**

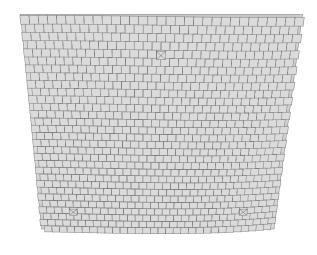
A1 - G1 ca. 35 Pixel 0.25mm -0.50mm zu hoch A7 - E10 ca. 100 Pixel 0.25mm -0.75mm zu hoch G4 - I8 ca. 70 Pixel 0.25-0.50mm zu gering

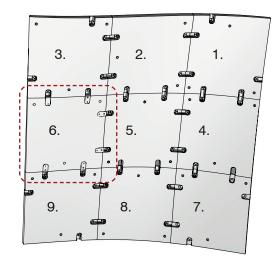
# Maximale Einstellungstiefe: 107.4 mm

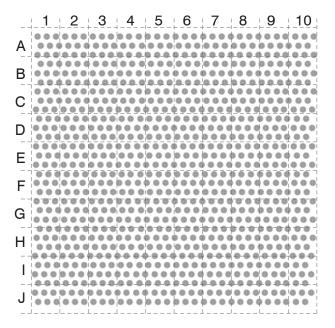
Anmerkung: Im Bereich G4, Reihe 19 ein Pixel >1,50mm durch Nachbarpixel mit verschoben. Dieser Fehler ist im gesamten weiteren Fabrikatiionsprozess erkennbar.

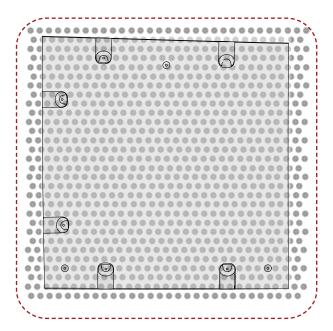
# gemessene Einstellung

Abweichung	Anzahl
>+1.50mm	1
+1.25 - +1.50mm	X
+1.00 - +1.25mm	1
+0.75 - +1.00mm	X
+0.50 - +0.75mm	X
+0.25 - +0.50mm	70
+0.250.25mm	663
-0.250.50mm	150
-0.500.75mm	29
-0.751.00mm	1
-1.001.25mm	X
-1.251.50m	X
>-1.50mm	X





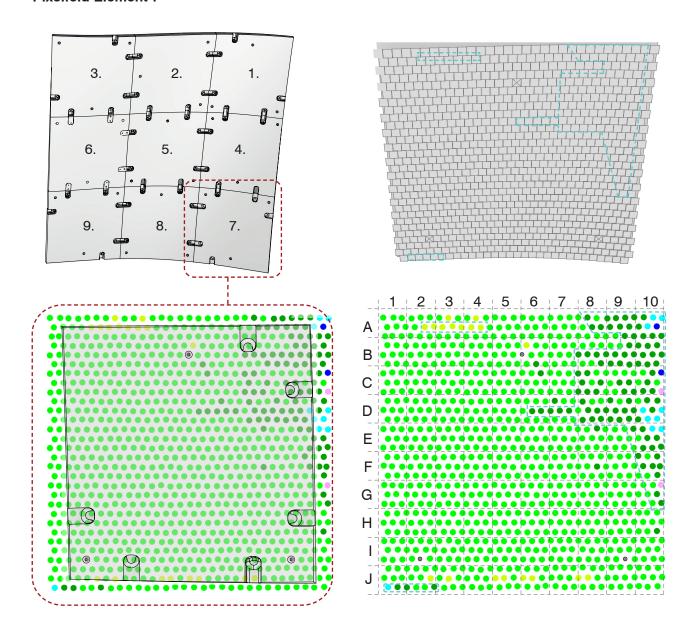




#### gemessene Einstellung

keine Messung druchgeführt

Maximale Einstellungstiefe: 28.4 mm



# Eingestellt in Reihenfolge: 5

**Einstellungsgenauigkeit:** 85,5% < +-0.25mm

# Nesterbildung ungenauer Einstellungen:

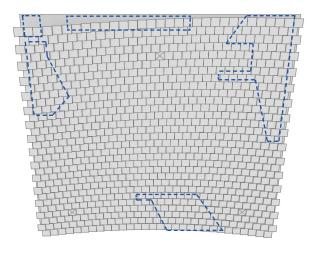
A2 - A4 ca. 7 Pixel 0.50mm -0.75mm zu gering A8 - G10 ca. 110 Pixel 0.25mm -1.25mm zu hoch

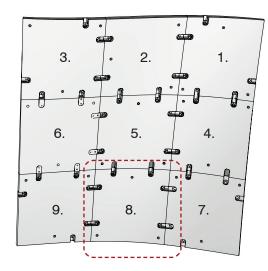
# Maximale Einstellungstiefe: 64.2 mm

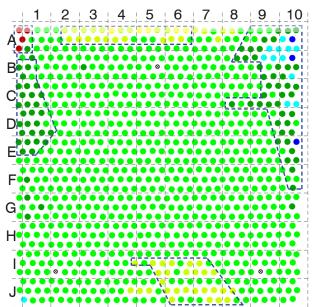
**Anmerkung:** Große Bandbreite der Abweichungen im Bereich A8 - G10 mit 0.25mm -1.25mm.

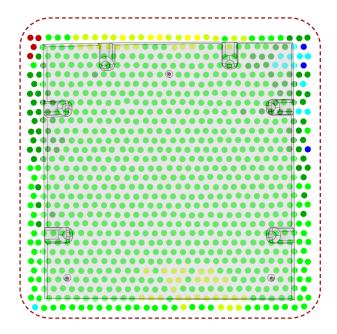
### gemessene Einstellung

Abweichung	Anzahl
>+1.50mm	X
+1.25 - +1.50mm	X
+1.00 - +1.25mm	X
+0.75 - +1.00mm	X
+0.50 - +0.75mm	X
+0.25 - +0.50mm	18
+0.250.25mm	782
-0.250.50mm	101
-0.500.75mm	10
-0.751.00mm	2
-1.001.25mm	X
-1.251.50m	1
>-1.50mm	1









# Eingestellt in Reihenfolge: 6

# gemessene Einstellung

Abweichung	An	zahl
>+1.50mm	4	
+1.25 - +1.50mm	Χ	
+1.00 - +1.25mm	Χ	
+0.75 - +1.00mm	Χ	
+0.50 - +0.75mm	5	
+0.25 - +0.50mm	52	
+0.250.25mm	760	
-0.250.50mm	79	
-0.500.75mm	12	
-0.751.00mm	2	
-1.001.25mm	1	
-1.251.50m	Х	
>-1.50mm	Χ	

**Einstellungsgenauigkeit:** 83,1% < +-0.25mm

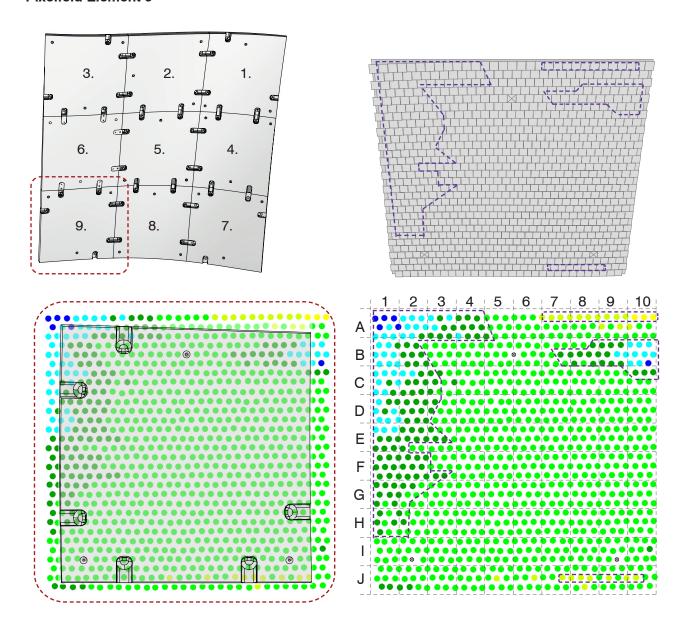
# Nesterbildung ungenauer Einstellungen:

A1 4 Pixel auf maximalen Verfahrweg eingestellt und somit >1.50mm zu gering

A2 - A7 ca. 25 Pixel 0.50mm -0.75mm zu gering B1 - E1 ca. 25 Pixel 0.25mm -0.50mm zu hoch A8 - E10 ca. 70 Pixel 0.25mm -1.00mm zu hoch

Maximale Einstellungstiefe: 148 mm

**Anmerkung:** Dieses Bauteil hat den maximalen Verfahrweg der Pixelfeldes ausgelotet und bei den vier Pixeln im Bereich A1 auf den max. Verfahrweg von 148 mm reduzieren müssen.



Eingestellt in Reihenfolge: 6

**Einstellungsgenauigkeit:** 76,8% < +-0.25mm

# **Nesterbildung ungenauer Einstellungen:**

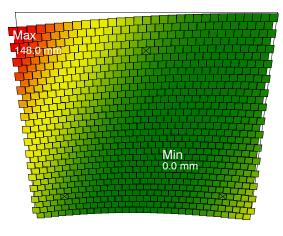
A1 - A4 - H2 ca. 145 Pixel 0.25mm -1.00mm zu hoch B7 - C10 ca. 35 Pixel 0.25mm -1.00mm zu hoch A7 - A10 ca. 15 Pixel 0.25mm -0.50mm zu gering J7 - J10 ca. 7 Pixel 0.25mm -0.50mm zu gering

Maximale Einstellungstiefe: 48.4 mm

Anmerkung: Dem Feld oben rechts steht ein 4x so großes Feld links mit ähnlichen Abweichungen gegenüber. Die Abweichungen zu geringer Einstellungen wirkt linear.

#### gemessene Einstellung

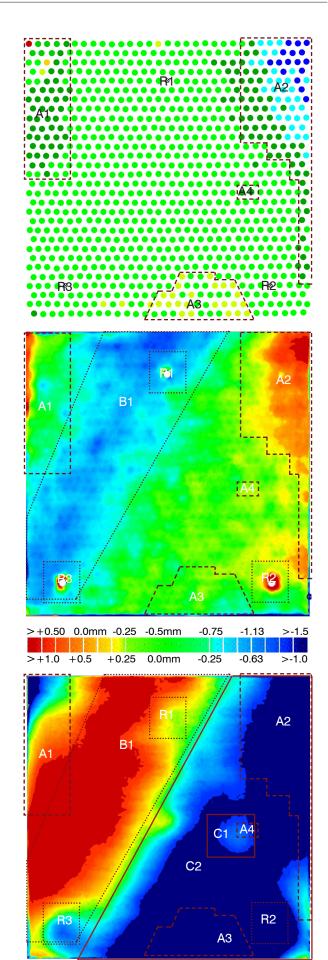
Abweichung	Anzahl
>+1.50mm	X
+1.25 - +1.50mm	Χ
+1.00 - +1.25mm	Χ
+0.75 - +1.00mm	Χ
+0.50 - +0.75mm	3
+0.25 - +0.50mm	23
+0.250.25mm	703
-0.250.50mm	128
-0.500.75mm	52
-0.751.00mm	6
-1.001.25mm	Χ
-1.251.50m	Χ
>-1.50mm	X



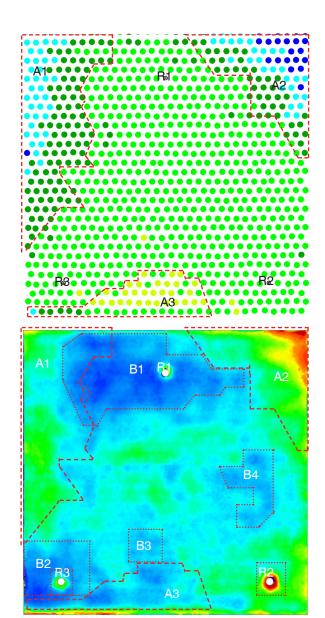
Verlauf der Einstellungstiefe im Pixelfeld Verfahrweg zwischen 0.0 und 148 mm. Maximale Einstellung wird im Bereich oben links die minimale im mittleren Bereich des Feldes. Ein Zusammenhang zwischen Einstellungstiefe und Abweichung ist im Bereich A2 möglich.

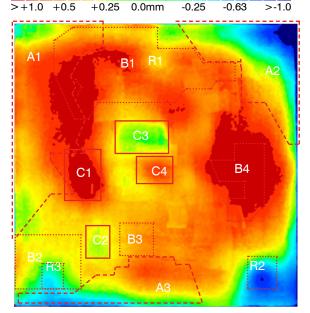
Übertrag über SH 40 10mm auf 3p-Sandform Nach dem Abformen befinden sich von ursprünglichen 78.4 % noch 50.5% der Sandform im Bereich ±0.25mm. Die die Toleranz überschreitenden Abweichungen sind mit 0.8% >-1.50mm und 0.48% >+0.50mm nur marginal vorhanden. Die erhöhenden Einstellungsabweichungen A1 und A2 werden in Quantität und Qualität klar sichtbar übernommen. Die zu geringen Einstellungen bei A3 und A4 sind nicht erkennbar. Die Einspannung der Referenzpixel überträgt sich bei Pixel R2 und R3 in Form lokaler positiver Deformationen. Im Bereich B1 bildet sich eine leichte Senke (-0.5 - -0.75 mm), die nicht in Zusammenhang mit den Einstellungsabweichungen steht. Das Bild der Einstellungen wird von der 3p-Sandform sehr genau abgebildet. Abweichungen zur Einstellung entstehen vorwiegend im negativen Bereich.

Übertrag über SH 40 50mm auf Offset-Sandform Nur noch 11.0% der Messpunkte befinden sich im Bereich ±0.25mm. 34.0% der Abweichungen überschreiten den negativen Toleranzwert von >-1.0mm und 14.9% den positiven von >+1.0mm. Die Charakteristik der Sandform ist weiterhin gutablesbar, der Übertrag der Einstellungen aber kaum noch wahrnehmbar. Dominiert wird das Erscheinungsbild von einer diagonal über das gesamte Feld laufende Senke C1 und deren korrespondierender Erhebung C2. Als neue Abweichung erscheint die lokale Erhebung C1.Diese Verformung wird den Fertigungstoleranzen der Matten zugeschrieben.



Pixelfeld, 3p-Sandform und Offset 1

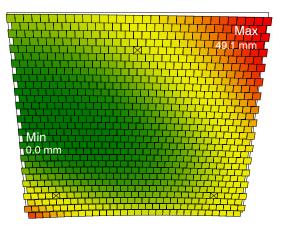




-1.13

Pixelfeld, 3p-Sandform und Offset 2

>+0.50 0.0mm -0.25 -0.5mm

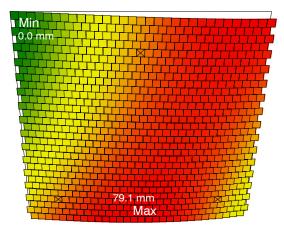


Verlauf der Einstellungstiefe im Pixelfeld Verfahrweg zwischen 0.0 und 148 mm. Maximale Einstellung wird im Bereich oben links die minimale im mittleren Bereich des Feldes erreicht. Ein Zusammenhang zwischen Einstellungstiefe und Abweichung ist im Bereich A2 möglich.

Übertrag über SH 40 10mm auf 3p-Sandform Nach dem Abformen befinden sich von ursprünglichen 70.9 % noch 43.6% der Sandform im Bereich ±0.25mm. Die die Toleranz überschreitenden Abweichungen sind mit 0.16% >-1.50mm und 0.22% >+0.50mm nur marginal vorhanden.

Die Einstellungsabweichungen A1 und A2 werden klar sichtbar übernommen. Als Folge wird die Abweichung B1 identifiziert. Auch zu geringe Einstellung bei A3 ist erkennbar, verschwimmt aber deutlich mehr. Bereiche B3 und4 stehen nicht in Zusammenhang mit den Einstellungsabweichungen. Das Bild der Einstellungen wird von der 3p-Sandform sehr genau abgebildet.

Übertrag über SH 40 50mm auf Offset-Sandform Die Charakteristik der Sandform ist weiterhin gutablesbar, der Übertrag der Einstellungen aber kaum noch wahrnehmbar. Nur noch 11.0% der Messpunkte befinden sich im Bereich ±0.25mm. 34.0% der Abweichungen überschreiten den negativen Toleranzwert von >-1.0mm und 14.9% den positiven von >+1.0mm. Die Tendenzen der Einstellung sind im Bereich A1, A2 und B1 weiterhin gut ablesbar, verschwimmen aber im Bereich A1. Die lokale Deformation im Bereich der Pixel R2 breitet sich aus. Im Bereiche R1 und R3 ist diese nicht mehr ablesbar. Das Erscheinungsbild wird von einigen neuen partiellen Senkungen und Erhebungen (C1-C6) geprägt. Diese Verformungen werden teils (C3, C4) den Fertigungstoleranzen der Matten zugeschrieben

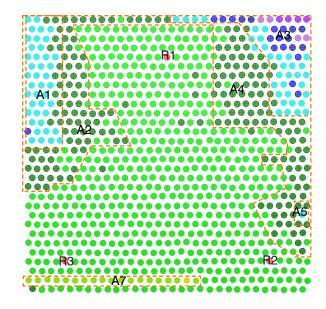


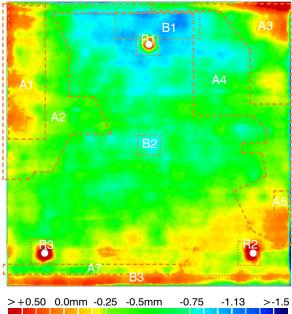
Verlauf der Einstellungstiefe im Pixelfeld Verfahrweg zwischen 0.0 und 79.1 mm. Maximale Einstellung wird im Bereich oben links die minimale unten mittig Bereich des Feldes erreicht. Es zeichnet sich kein Zusammenhang zwischen Einstellungstiefe und Abweichung ab.

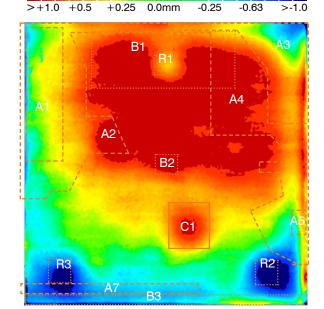
Übertrag über SH 40 10mm auf 3p-Sandform Nach dem Abformen befinden sich von ursprünglichen 65.2 % noch 59.4% der Sandform im Bereich ±0.25mm. Die die Toleranz überschreitenden Abweichungen sind mit 0.26% >-1.50mm und 0.51% >+0.50mm nur marginal vorhanden.

Die Einstellungsabweichungen A1 und A3 werden klar sichtbar übernommen, die Ausläufer A2 und A4 nicht mehr. Die Einspannung der Referenzpixel überträgt bei allen Pixeln in Form lokaler negativer Deformationen. Im Bereich B1 bildet sich eine leichte Senke, die nicht in Zusammenhang mit den Einstellungsabweichungen steht. Die Abweichung A7 und B3 werden im Zusammenhang mit Fertigungstoleranz und Einstellung gesehen

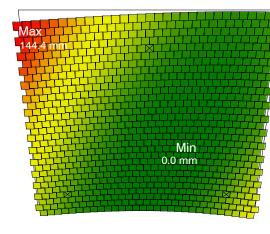
Übertrag über SH 40 50mm auf Offset-Sandform Die Charakteristik der Sandform ist weiterhin gutablesbar, der Übertrag der Einstellungen aber kaum noch wahrnehmbar. Nur noch 25.6% der Messpunkte befinden sich im Bereich ±0.25mm. 1.54% der Abweichungen überschreiten den negativen Toleranzwert von >-1.0mm und 15.7% den positiven von >+1.0mm. Die lokalen Deformation der Referenzpixel R1 - R3 breiten sich aus. Die lokalen Verformungen C1 werden den Fertigungstoleranzen der Matten zugeschrieben.

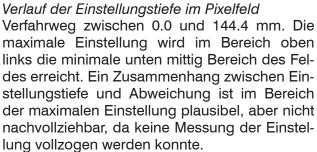






Pixelfeld, 3p-Sandform und Offset 3

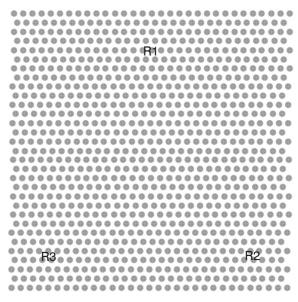


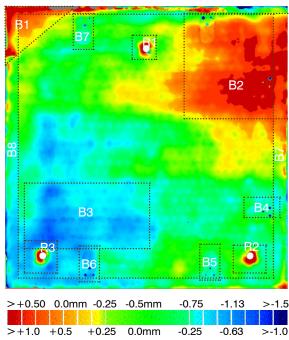


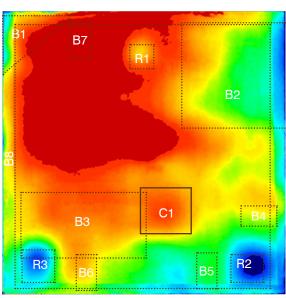
Übertrag über SH 40 10mm auf 3p-Sandform Die Einstellung konnte nicht überprüft werden. Nach dem Abformen befinden sich von ursprünglichen 50.5% der Sandform im Bereich ±0.25mm. Die die Toleranz überschreitenden Abweichungen sind mit 0.31% >-1.50mm nur marginal und 2.91% >+0.50mm gering vorhanden.

Die Einspannung der Referenzpixel überträgt sich bei Pixel R1 - R3 in Form lokaler positiver Deformationen. Die scharfkantige Umrahmung B8, welche sich im Scanbild abzeichnet so wie die Löcher B3 - B7 sind in der Mehrfachverwendung der Sandform begründet.

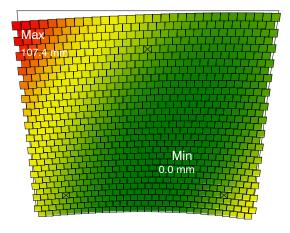
Übertrag über SH 40 50mm auf Offset-Sandform Nur noch 24.3% von ursprünglichen 50.5% der Messpunkte befinden sich im Bereich ±0.25mm. 0.78% der Abweichungen überschreiten den negativen Toleranzwert von >-1.0mm und 21.2% den positiven von >+1.0mm.Die gemessenen lokalen Deformationen im Bereich B1 und B2 sind deutlich reduziert und besonders im Bereich B1 kaum noch erkennbar. Die scharfkantige Umrahmung der Zementreste auf der Sandschalung sind auch auf dieser Seite deutlich wahrnehmbar. Die Bearbeitungsspuren B4 - B6 werden nur noch schwach wahrgenommen. Die Verformungen um C1 werden den Fertigungstoleranzen der Matten zugeschrieben.







Pixelfeld, 3p-Sandform und Offset 4

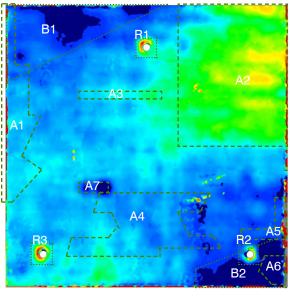


Verlauf der Einstellungstiefe im Pixelfeld Verfahrweg zwischen 0.0 und 107.4 mm. Dabei wird die maximale Einstellung oben links die minimale mittig des Feldes erreicht. Ein Zusammenhang zwischen Einstellungstiefe und Abweichung ist nicht erkennbar.

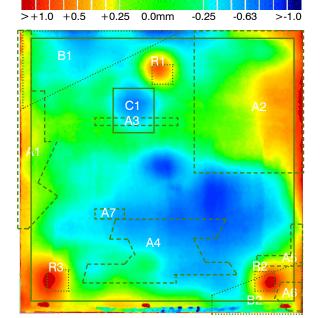
Übertrag über SH 40 10mm auf 3p-Sandform Nach dem Abformen befinden sich von ursprünglichen 72.4 % noch 21.4% der Sandform im Bereich ±0.25mm. Dies ist allerdings in einem Versatz der gesamten Fläche begründet. Legt man diese 0.5mm tiefer befinden sich 58.3% im Bereich ±0.25mm. Die die Toleranz überschreitenden Abweichungen sind mit 3.08% >1.50mm und 0.51% >+1.33mm nur gering vorhanden. Die hohe Anzahl an kleinflächigen Abweichungen wird nur vereinzelt übernommen. A2 und A7 sind die einzig sichtbaren Deformationen. Die Einstellungsungenauigkeiten A1 und A3 - A6 sind nicht mehr erkennbar.

Übertrag über SH 40 50mm auf Offset-Sandform Noch 47.3% von ursprünglichen 58.3% der Messpunkte befinden sich im Bereich ±0.25mm. 0.08% der Abweichungen überschreiten den negativen Toleranzwert von >-1.0mm und 0.94% den positiven von >+1.0mm. Bereich von >-1.0 mm im Bereich C1 dominiert. Die lokale Deformation C1 und der Bereich C3 werden den Fertigungstoleranzen der Matten zugeschrieben. Die scharfkantigen Umrisse C2, welche sich im Scanbild abzeichnen, sind der Mehrfachverwendung der Sandform geschuldet.



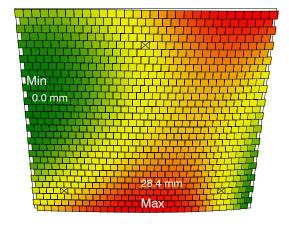


-1.13



Pixelfeld, 3p-Sandform und Offset 5

>+0.50 0.0mm -0.25 -0.5mm

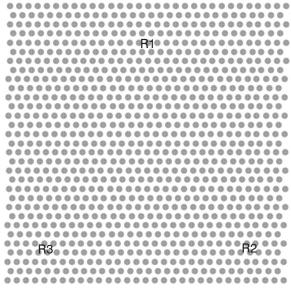


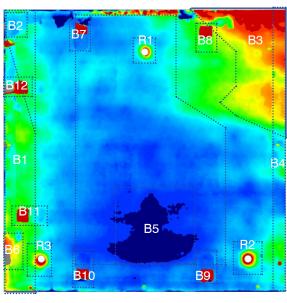
Verlauf der Einstellungstiefe im Pixelfeld Verfahrweg zwischen 0.0 und 28.4 mm. Die maximale Einstellung wird im Bereich unten mittig die minimale im linken Bereich des Feldes erreicht. Ein Zusammenhang zwischen Einstellungstiefe und Abweichung ist nicht erkennbar.

Übertrag über SH 40 10mm auf 3p-Sandform Die Einstellung konnte nicht überprüft werden. Nach dem Abformen befinden sich 21.1% der Sandform im Bereich ±0.25mm.. Dies ist allerdings in einem Versatz der gesamten Fläche begründet. Legt man diese 0.5mm tiefer befinden sich 47.7% im Bereich ±0.25mm. Die die Toleranz überschreitenden Abweichungen sind mit 3.81% >-1.50mm und 2.57% >+0.50mm nur gering vorhanden. Die Abweichungen B1 und B2 scheinen in der Einstellung begründet zu sein, die auch im Umkehrschluss für die großflächige Deformation ursächlich scheint. Die scharfkantigen Umrisse B3 und B4, welche sich im Scanbild abzeichnen so wie die Bereiche B9 - B14, sind der Mehrfachverwendung der Sandform geschuldet. Die Einspannung der Referenzpixel überträgt sich bei Pixel R1 - R3 in Form lokaler negativer Deformationen.

Übertrag über SH 40 50mm auf Offset-Sandform Nur noch 11.5% von ursprünglichen 50.5% der Messpunkte befinden sich im Bereich ±0.25mm. 2.18% der Abweichungen überschreiten den negativen Toleranzwert von >-1.0mm und 47.3% den positiven von >+1.0mm.

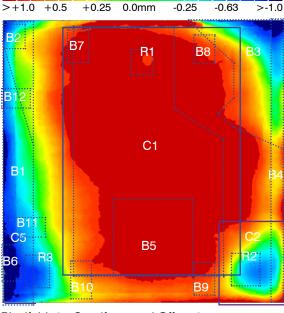
Die Tendenzen der Einstellung in Form lokaler Deformationen sind nicht mehr erkennbar. Das gesamte Erscheinungsbild wird der großflächigen Abweichung dominiert, welche im mittleren Bereich Abweichungen im negativen Bereich von >-1.0 mm und beiderseitig im Randbereich im positiven Bereich von >+1.0 mm.





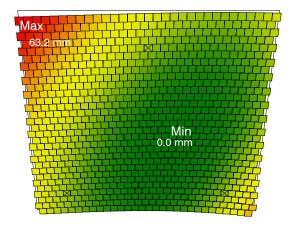
-0.75

-1.13



Pixelfeld, 3p-Sandform und Offset 6

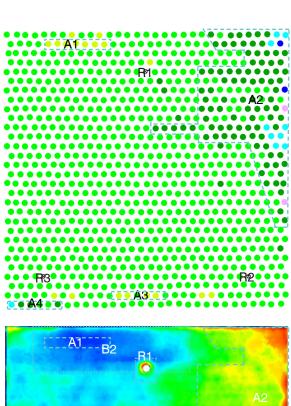
>+0.50 0.0mm -0.25 -0.5mm

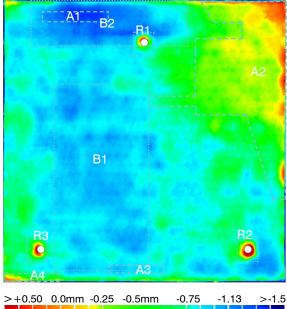


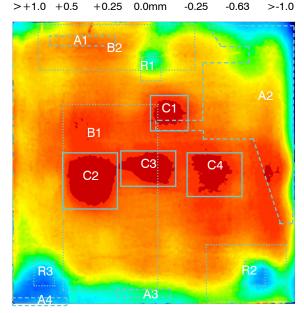
Verlauf der Einstellungstiefe im Pixelfeld Verfahrweg zwischen 0.0 und 63.2 mm. Die maximale Einstellung im Bereich oben links die minimale im mittleren Bereich des Feldes erreicht. Ein Zusammenhang zwischen Einstellungstiefe und Abweichung ist nicht erkennbar.

Übertrag über SH 40 10mm auf 3p-Sandform Nach dem Abformen befinden sich von ursprünglichen 85.5% noch 42.5% der Sandform im Bereich ±0.25mm. Die die Toleranz überschreitenden Abweichungen sind mit 0.83% >-1.50mm und 1.02% >+0.50mm nur marginal vorhanden. Insgesamt wird das gesamte Einstellungsbild genau übernommen und ist sehr homogen. Der wie erneute Abweichungen wirkenden Bereiche B1 ist eine Folge der Ausrichtung. Der Bereich B2 kann nicht mit den Einstellungen in Zusammenhang gebracht werden. Die Einspannung der Referenzpixel überträgt sich bei allen Pixeln R1 - R3 in Form lokaler positiver Deformationen.

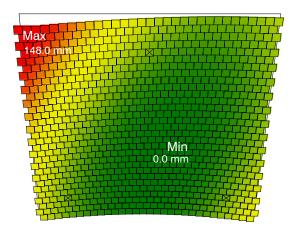
Übertrag über SH 40 50mm auf Offset-Sandform Nur noch 17.6% von ursprünglichen 42.5% der Messpunkte befinden sich im Bereich ±0.25mm. 0.52% der Abweichungen überschreiten den negativen Toleranzwert von >-1.0mm und 4.40% den positiven von >+1.0mm. Die Verformungen C1 - C4 in Form von Erhebungen >-0.75 mm werden teilweise den Fertigungstoleranzen der Matten zugeschrieben.







Pixelfeld, 3p-Sandform und Offset 7

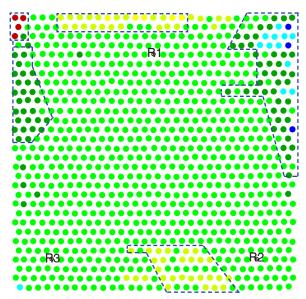


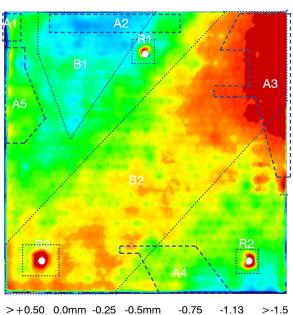
Verlauf der Einstellungstiefe im Pixelfeld Verfahrweg zwischen 0.0 und 148 mm. Die maximale Einstellung wird im Bereich oben links die minimale im mittleren Bereich des Feldes erreicht und von vier Pixeln überschritten. Ein Zusammenhang zwischen Einstellungstiefe und Abweichung ist nicht erkennbar.

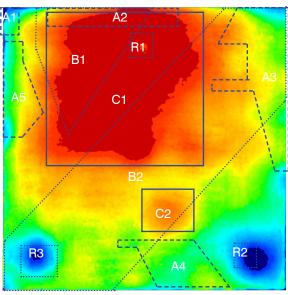
Übertrag über SH 40 10mm auf 3p-Sandform Nach dem Abformen befinden sich von ursprünglichen 83.1 % nur noch 37.4% der Sandform im Bereich ±0.25mm. Die die Toleranz überschreitenden Abweichungen sind mit 0.67% >-1.50mm gering und 5.35% >+0.50mm recht stark vorhanden.

Die Einstellungsabweichungen A2 und A3 werden sichtbar übernommen und weiten sich aus. Das auf das Maximum eingestellte Feld A1 bildet sich nicht ab, obwohl es die größte Abweichung darstellt. Auch die zu geringe Einstellung A4 ist nicht mehr sichtbar. Die Einspannung der Referenzpixel überträgt sich bei Pixeln R1 und R2 in Form lokaler positiver Deformationen; allerdings im Verhältnis gering. Die Erhöhungen (>+0.75 mm) Bereich B2 lassen sich nicht in Zusammenhang mit den Einstellungsabweichungen stellen.

Übertrag über SH 40 50mm auf Offset-Sandform Noch 33.0% von ursprünglichen 83.1% der Messpunkte befinden sich im Bereich ±0.25mm. 0.67% der Abweichungen überschreiten den negativen Toleranzwert von >-1.0mm und 17.2% den positiven von >+1.0mm.Die Tendenzen der Einstellung in Form lokaler Deformationen sind noch schwach erkennbar. Die vom Bereich B1 und A3 entstanden Abweichungen spiegeln sich in Feld C1 wieder.Die Deformationene der Referenzpixel bilden sich vergrößert ab. Die Verformungen C2 könnte in Zusammenhang mit den Fertigungstoleranzen der Matten stehen.







0.0mm

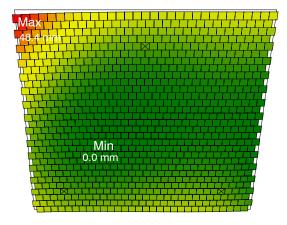
-0.25

-0.63

Pixelfeld, 3p-Sandform und Offset 8

>+1.0 +0.5

+0.25

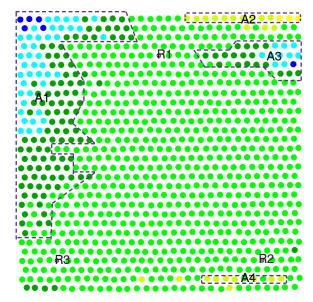


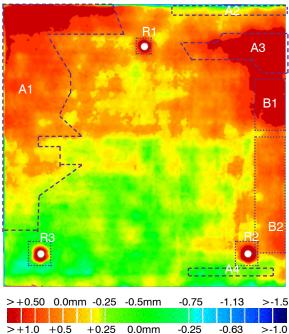
Verlauf der Einstellungstiefe im Pixelfeld Verfahrweg zwischen 0.0 und 48.4 mm. Die maximale Einstellung wird im Bereich oben links, die minimale im mittleren Bereich des Feldes erreicht. Ein Zusammenhang zwischen Einstellungstiefe und Abweichung ist im Bereich A1 möglich.

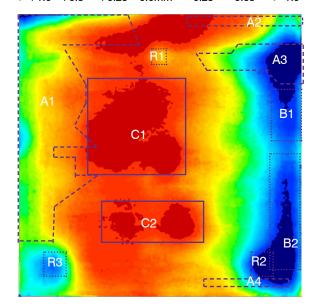
Übertrag über SH 40 10mm auf 3p-Sandform Nach dem Abformen befinden sich von ursprünglichen 76.8 % nur noch 20.8% der Sandform im Bereich ±0.25mm. Die die Toleranz überschreitenden Abweichungen sind mit 0.01% >-1.50mm marginal und 6.71% >+0.50mm recht stark vorhanden. Dies ist allerdings in einem Versatz der gesamten Fläche begründet. Legt man diese 0.5mm höher befinden sich 57.1% im Bereich ±0.25mm.

Die Einstellungsabweichungen A1 – A4 werden klar sichtbar übernommen. Die Einspannung der Referenzpixel überträgt sich vor allem bei Pixel R2 und R3 in Form lokaler positiver Deformationen. Im Bereich B1 und B2 bilden sich leichte Erhöhungen, die nicht in Zusammenhang mit den Einstellungsabweichungen stehen.

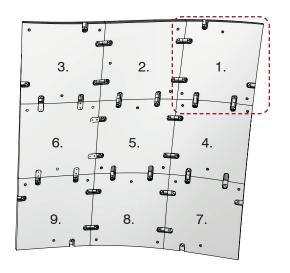
Übertrag über SH 40 50mm auf Offset-Sandform Noch 19.8% von ursprünglichen 20.8% der Messpunkte befinden sich im Bereich ±0.25mm. 3.70% der Abweichungen überschreiten den negativen Toleranzwert von >-1.0mm und 8.87% den positiven von >+1.0mm. Die Tendenzen der Einstellung in Form lokaler Deformationen sindgut erkennbar. Die Verformungen C1 hat sich neu gebildet, C2 wird den Fertigungstoleranzen der Matten zugeschrieben.

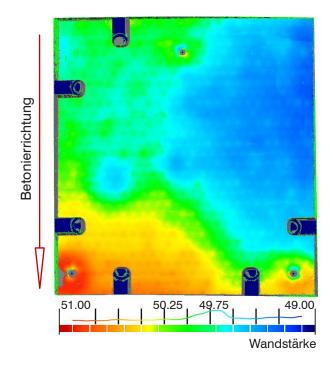




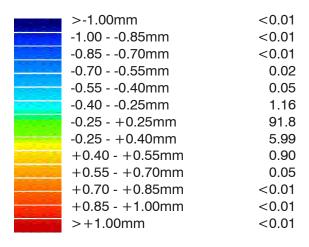


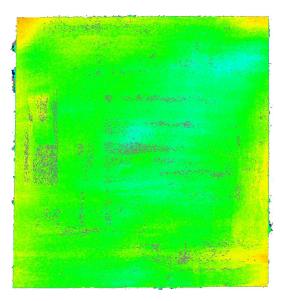
Pixelfeld, 3p-Sandform und Offset 9



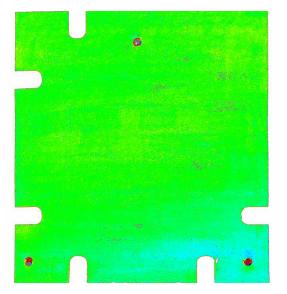


# Übertragungsgenauigkeit Best-Fit in % Seite Offset

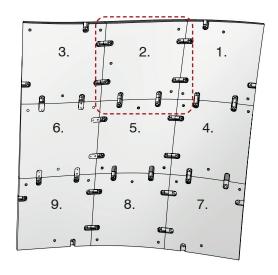


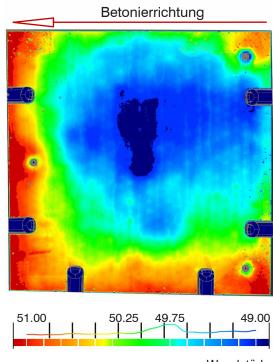


>-1.00mm	0.38
-1.000.85mm	0.28
-0.850.70mm	0.50
-0.700.55mm	0.27
-0.550.40mm	0.27
-0.400.25mm	1.66
-0.25 - +0.25mm	96.0
-0.25 - +0.40mm	0.25
+0.40 - +0.55mm	0.08
+0.55 - +0.70mm	0.06
+0.70 - +0.85mm	0.04
+0.85 - +1.00mm	0.02
>+1.00mm	0.09



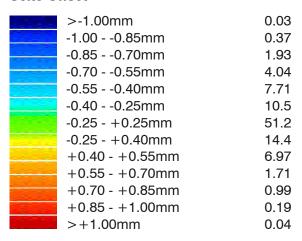
Abweichungen 3p Ausrichtung	in %	Abweichungen Best-Fit Ausrichtung	in %
>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	20.4 3.21 3.20 3.93 4.50 8.09 17.5 4.61 4.16 3.58 3.90 4.00 18.9	>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	2.15 2.13 5.60 6.05 6.83 10.3 43.1 7.71 4.78 4.53 3.11 1.11 2.56
+1.00 +0.25 -0.25	-1.00	+1.00 +0.25 -0.25	-1.00

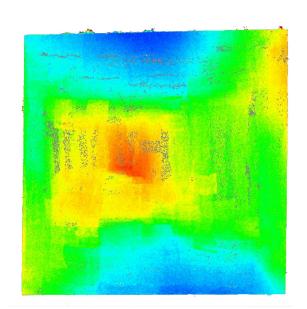




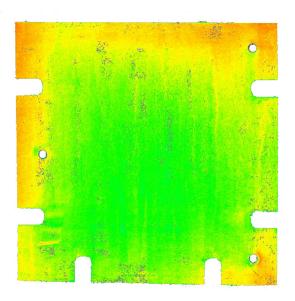
Wandstärke

# Übertragungsgenauigkeit Best-Fit in % Seite Offset

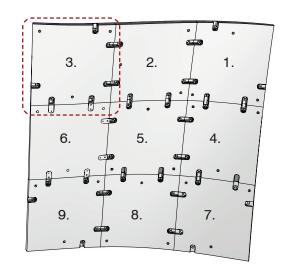




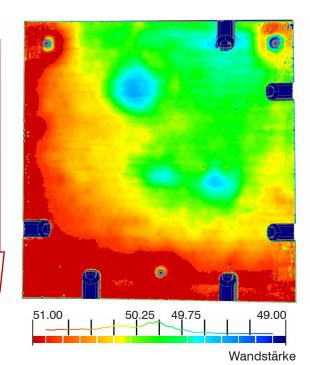
>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	<0.01 <0.01 <0.01 0.02 0.04 65.2 21.2 10.7 2.57 0.09 <0.01
---	--



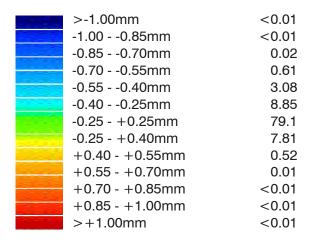
# Abweichungen 3p Ausrichtung Abweichungen Best-Fit Ausrichtung in % in % 4.25 >-1.00mm 16.1 >-1.00mm -1.00 - -0.85mm -1.00 - -0.85mm 3.68 2.45 -0.85 - -0.70mm -0.85 - -0.70mm 4.42 3.41 -0.70 - -0.55mm 3.91 -0.70 - -0.55mm 6.70 -0.55 - -0.40mm 4.57 -0.55 - -0.40mm 10.2 -0.40 - -0.25mm -0.40 - -0.25mm 10.3 6.57 -0.25 - +0.25mm 27.1 -0.25 - +0.25mm 31.6 -0.25 - +0.40mm 6.25 -0.25 - +0.40mm 7.84 +0.40 - +0.55mm 5.63 +0.40 - +0.55mm 5.27 +0.55 - +0.70mm +0.55 - +0.70mm 5.45 2.77 +0.70 - +0.85mm 5.19 +0.70 - +0.85mm 3.17 +0.85 - +1.00mm +0.85 - +1.00mm 4.12 2.41 >+1.00mm 9.19 >+1.00mm 7.36 -1.00

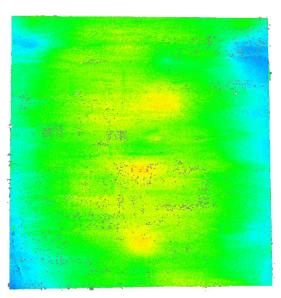


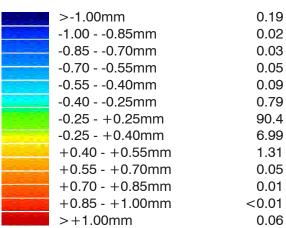
Betonierrichtung

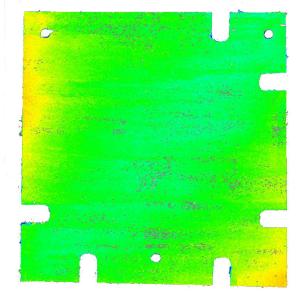


# Übertragungsgenauigkeit Best-Fit in % Seite Offset

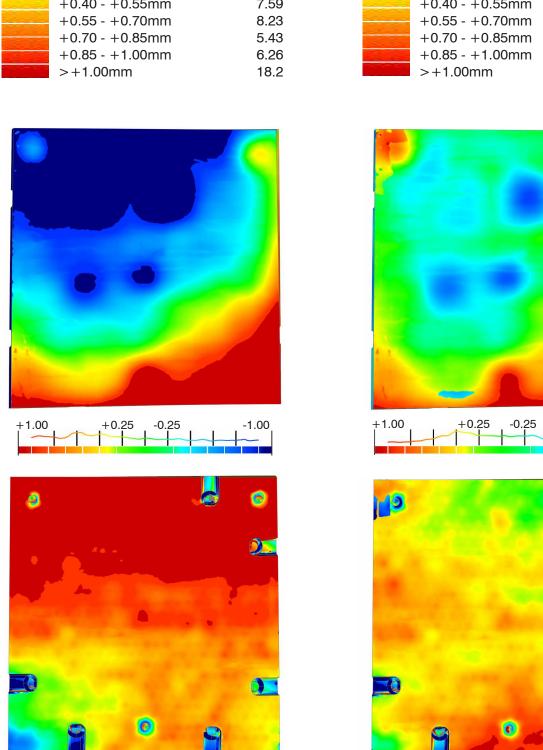


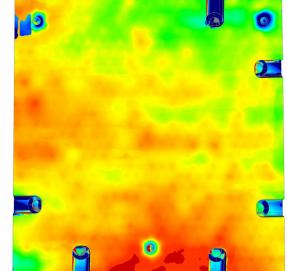


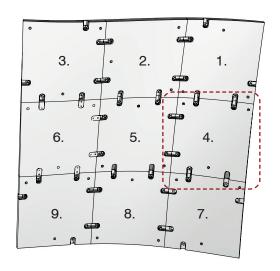


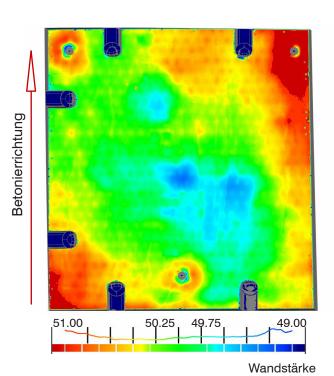


#### Abweichungen 3p Ausrichtung in % **Abweichungen Best-Fit Ausrichtung** in % >-1.00mm 14.9 >-1.00mm 2.43 -1.00 - -0.85mm -1.00 - -0.85mm 3.29 0.70 -0.85 - -0.70mm -0.85 - -0.70mm 3.23 0.24 -0.70 - -0.55mm 2.99 -0.70 - -0.55mm 1.62 -0.55 - -0.40mm 3.43 -0.55 - -0.40mm 2.82 -0.40 - -0.25mm 3.83 -0.40 - -0.25mm 8.83 -0.25 - +0.25mm 15.4 -0.25 - +0.25mm 37.5 -0.25 - +0.40mm 7.15 -0.25 - +0.40mm 16.2 +0.40 - +0.55mm 7.59 +0.40 - +0.55mm 12.8 +0.55 - +0.70mm 8.23 +0.55 - +0.70mm 6.77 +0.70 - +0.85mm 5.43 +0.70 - +0.85mm 3.34 +0.85 - +1.00mm 6.26 +0.85 - +1.00mm 2.42 >+1.00mm 18.2 >+1.00mm 4.28



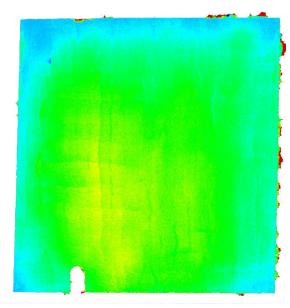




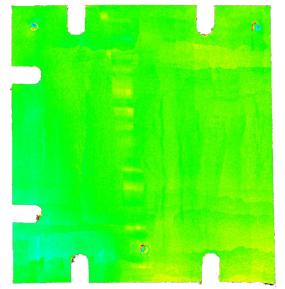


# Übertragungsgenauigkeit Best-Fit in % Seite Offset

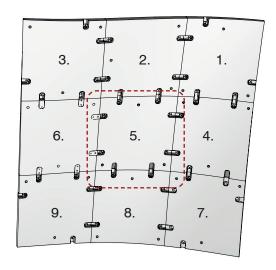
>-1.00mm	< 0.01
-1.000.85mm	< 0.01
-0.850.70mm	< 0.01
-0.700.55mm	0.04
-0.550.40mm	3.75
-0.400.25mm	11.5
-0.25 - +0.25mm	82.7
-0.25 - +0.40mm	1.88
+0.40 - +0.55mm	0.02
+0.55 - +0.70mm	< 0.01
+0.70 - +0.85mm	< 0.01
+0.85 - +1.00mm	< 0.01
>+1.00mm	< 0.01

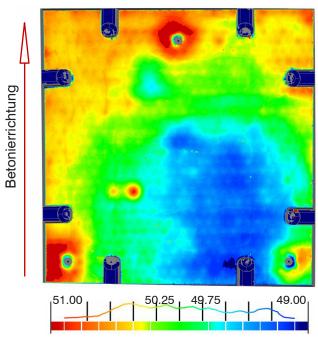


>-1.00mm	< 0.01
-1.000.85mm	< 0.01
-0.850.70mm	< 0.01
-0.700.55mm	< 0.01
-0.550.40mm	0.04
-0.400.25mm	0.23
-0.25 - +0.25mm	97.8
-0.25 - +0.40mm	1.80
+0.40 - +0.55mm	0.04
+0.55 - +0.70mm	0.02
+0.70 - +0.85mm	< 0.01
+0.85 - +1.00mm	< 0.01
>+1.00mm	0.01



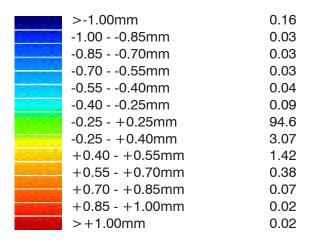
Abweichungen 3p Ausrichtung	in %	Abweichungen Best-Fit Ausrichtung	in %
>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	27.8 5.46 5.13 2.82 2.50 2.47 6.26 1.25 1.20 2.02 3.48 5.02 34.6	>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	2.39 0.61 1.17 2.08 4.06 7.28 47.1 18.5 9.45 3.95 1.72 0.43 1.27
+1.00 +0.25 -0.25	-1.00	+1.00 +0.25 -0.25 -1	1.00
	•		3

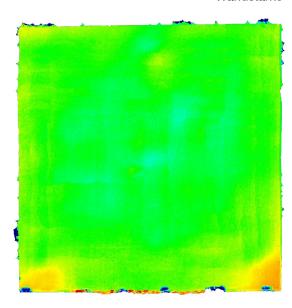




Wandstärke

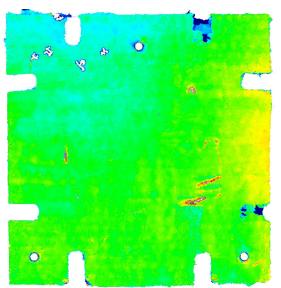
# Übertragungsgenauigkeit Best-Fit in % Seite Offset





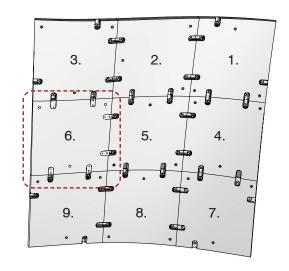
# Übertragungsgenauigkeit Best-Fit Seite 3p

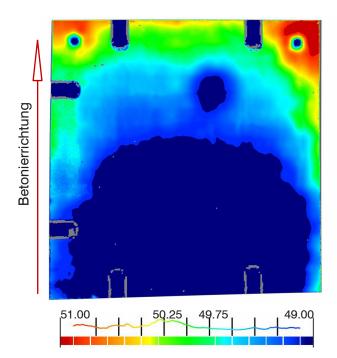
>-1.00mm	0.05
-1.000.85mm	0.04
-0.850.70mm	0.05
-0.700.55mm	0.09
-0.550.40mm	0.19
-0.400.25mm	5.18
-0.25 - +0.25mm	89.3
-0.25 - +0.40mm	4.19
+0.40 - +0.55mm	0.19
+0.55 - +0.70mm	0.06
+0.70 - +0.85mm	0.03
+0.85 - +1.00mm	0.03
>+1.00mm	0.11



in %

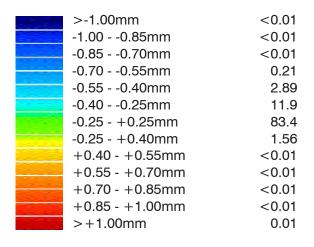
Abweichungen 3p Ausrichtung Abb. 4.5-26	in %	Abweichungen Best-Fit Ausrichtung	in %
>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	10.2 3.17 3.82 4.37 5.47 6.32 24.9 11.2 13.5 9.45 3.80 1.11 2.80	>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	4.57 2.58 3.63 3.59 3.84 5.26 50.0 16.0 6.10 2.20 0.62 0.51 1.16
+1.00 +0.25 -0.25	-1.00	+1.00 +0.25 -0.25 -	1.00

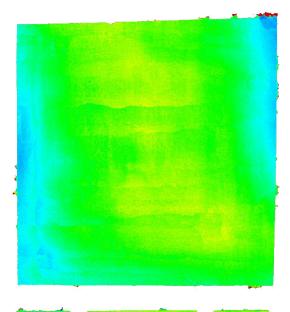




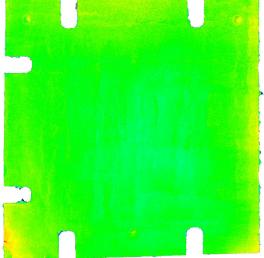
Wandstärke

# Übertragungsgenauigkeit Best-Fit in % Seite Offset





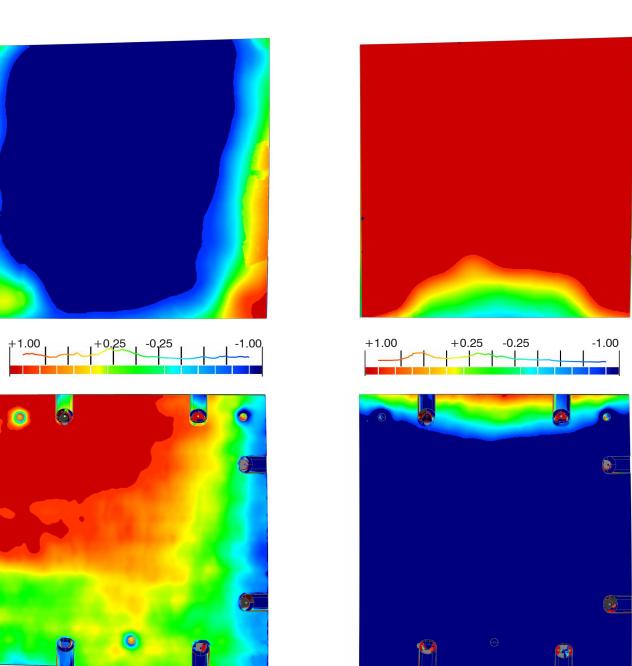
>-1.00mm	0.02
-1.000.85mm	< 0.01
-0.850.70mm	< 0.01
-0.700.55mm	0.01
-0.550.40mm	0.03
-0.400.25mm	0.05
-0.25 - +0.25mm	97.8
-0.25 - +0.40mm	1.99
+0.40 - +0.55mm	0.12
+0.55 - +0.70mm	< 0.01
+0.70 - +0.85mm	< 0.01
+0.85 - +1.00mm	< 0.01
>+1.00mm	< 0.01

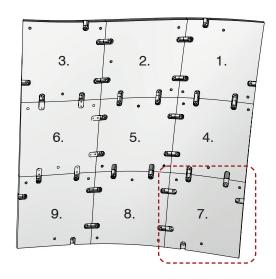


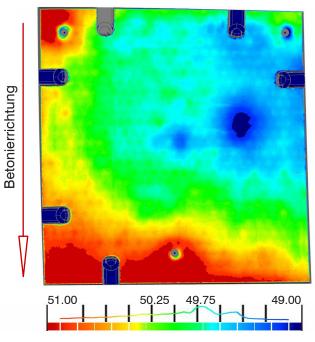
>-1.00mm       34.3       >-1.000.85mm         -1.000.85mm       3.30       -1.000.85mm         -0.850.70mm       -0.850.70mm         -0.700.55mm       2.98       -0.700.55mm         -0.550.40mm       2.49       -0.550.40mm         -0.400.25mm       2.61       -0.400.25mm         -0.25 - +0.25mm       17.1       -0.25 - +0.25mm         -0.25 - +0.40mm       5.35       -0.25 - +0.40mm         +0.40 - +0.55mm       4.32       +0.40 - +0.55mm         +0.55 - +0.70mm       4.37       +0.55 - +0.70mm         +0.70 - +0.85mm       3.57       +0.70 - +0.85mm	weichungen 3p Ausrichtung	in %	Abweichungen Best-Fit Ausrichtung
+0.85 - +1.00mm	-1.000.85mm	3.30	-1.000.85mm
	-0.850.70mm	3.34	-0.850.70mm
	-0.700.55mm	2.98	-0.700.55mm
	-0.550.40mm	2.49	-0.550.40mm
	-0.400.25mm	2.61	-0.400.25mm
	-0.25 - +0.25mm	17.1	-0.25 - +0.25mm
	-0.25 - +0.40mm	5.35	-0.25 - +0.40mm
	+0.40 - +0.55mm	4.32	+0.40 - +0.55mm
	+0.55 - +0.70mm	4.37	+0.55 - +0.70mm
	+0.70 - +0.85mm	3.57	+0.70 - +0.85mm
	+0.85 - +1.00mm	4.79	+0.85 - +1.00mm

in %

36.0 0.80 0.84 0.97 1.29 1.42 7.78 1.88 1.97 3.10 1.72 1.20 41.1

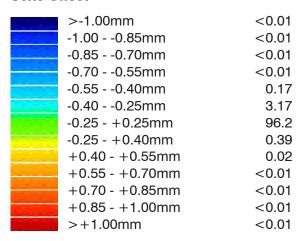


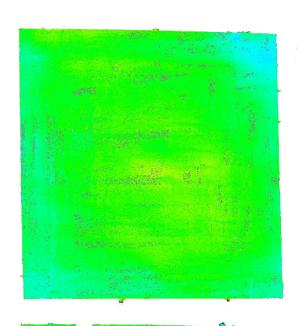




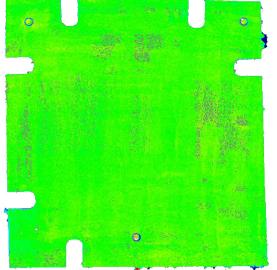
Wandstärke

# Übertragungsgenauigkeit Best-Fit in % Seite Offset



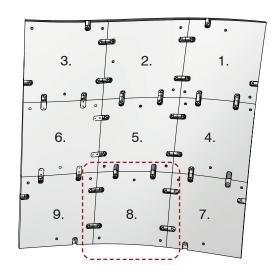


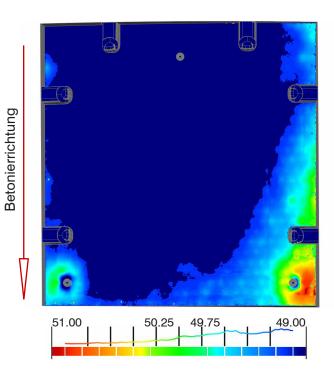
>-1.00mm	0.03
-1.000.85mm	0.03
-0.850.70mm	0.04
-0.700.55mm	0.07
-0.550.40mm	0.06
-0.400.25mm	0.12
-0.25 - +0.25mm	99.1
-0.25 - +0.40mm	0.43
+0.40 - +0.55mm	0.05
+0.55 - +0.70mm	0.02
+0.70 - +0.85mm	< 0.01
+0.85 - +1.00mm	< 0.01
>+1.00mm	< 0.01



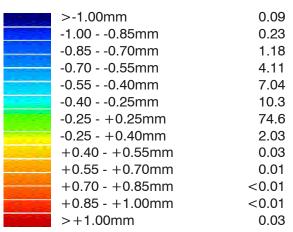
Abweichungen 3p Ausrichtung	in %	Abweichungen Best-Fit Ausrichtung	in %
>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	9.24 5.29 6.29 8.08 9.35 7.22 15.5 4.17 5.11 5.60 5.07 4.42 14.7	>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	1.82 0.70 0.98 1.78 5.59 11.8 49.5 14.3 6.22 3.19 2.03 1.13 0.96
+1.00 +0.25 -0.25	-1.00	+1.00 +0.25 -0.25 -1	1.00

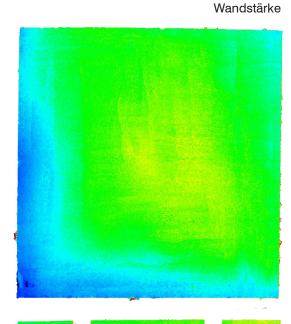
### Sichtflächen Schalenelement 8





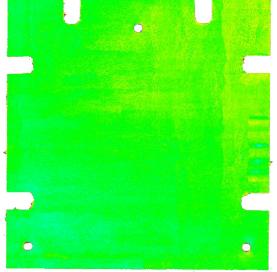
### Übertragungsgenauigkeit Best-Fit in % Seite Offset





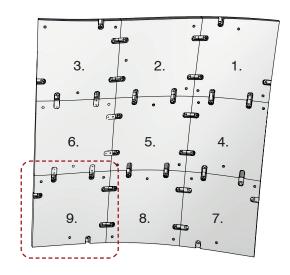
### Übertragungsgenauigkeit Best-Fit in % Seite 3p

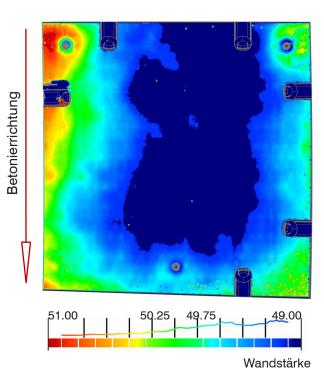
>-1.00mm	< 0.01
-1.000.85mm	< 0.01
-0.850.70mm	< 0.01
-0.700.55mm	< 0.01
-0.550.40mm	< 0.01
-0.400.25mm	0.14
-0.25 - +0.25mm	98.2
-0.25 - +0.40mm	1.24
+0.40 - +0.55mm	0.07
+0.55 - +0.70mm	0.03
+0.70 - +0.85mm	0.02
+0.85 - +1.00mm	0.01
>+1.00mm	0.11



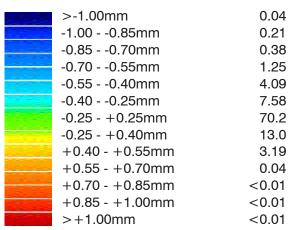
Abweichungen 3p Ausrichtung	in %	Abweichungen Best-Fit Ausrichtung	in %
>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	40.8 2.73 2.85 3.71 3.85 3.62 11.2 3.01 4.32 3.27 3.08 3.35 14.2	>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	16.1 10.6 17.1 13.9 8.71 6.28 17.3 5.64 2.50 1.02 0.50 0.05 0.21
+1.00 +0.25 -0.25	-1.00	+1.00 +0.25 -0.25 -1	1.00

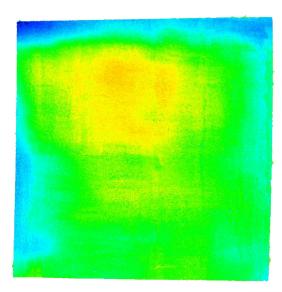
### Sichtflächen Schalenelement 9





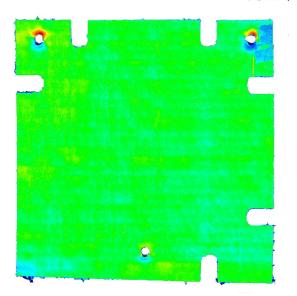
### Übertragungsgenauigkeit Best-Fit in % Seite Offset



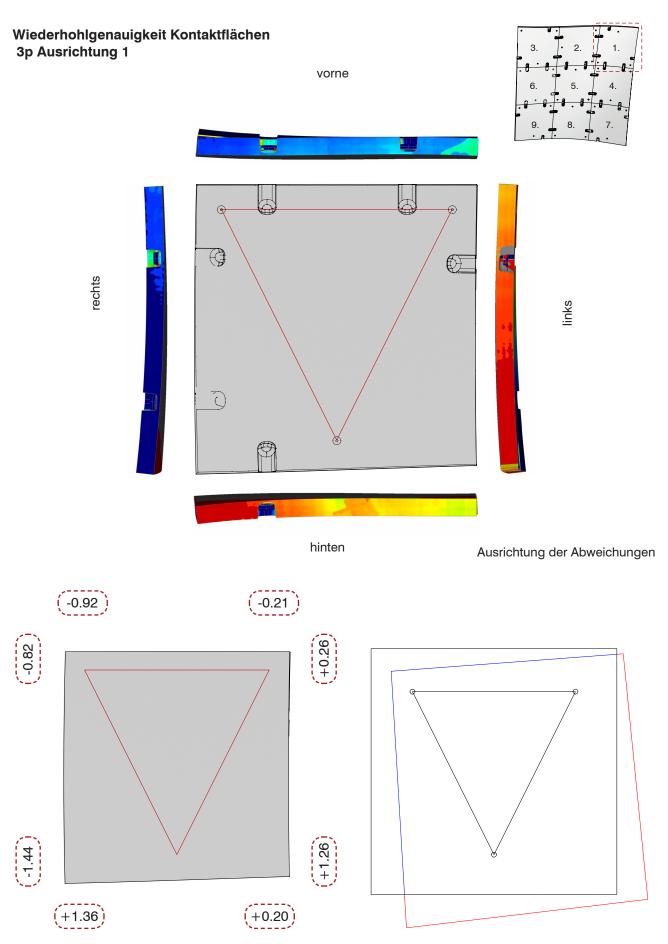


### Übertragungsgenauigkeit Best-Fit in % Seite Offset

>-1.00mm	0.38
-1.000.85mm	0.28
-0.850.70mm	0.50
-0.700.55mm	0.27
-0.550.40mm	0.27
-0.400.25mm	1.66
-0.25 - +0.25mm	96.1
-0.25 - +0.40mm	0.25
+0.40 - +0.55mm	0.09
+0.55 - +0.70mm	0.06
+0.70 - +0.85mm	0.04
+0.85 - +1.00mm	0.03
>+1.00mm	0.09

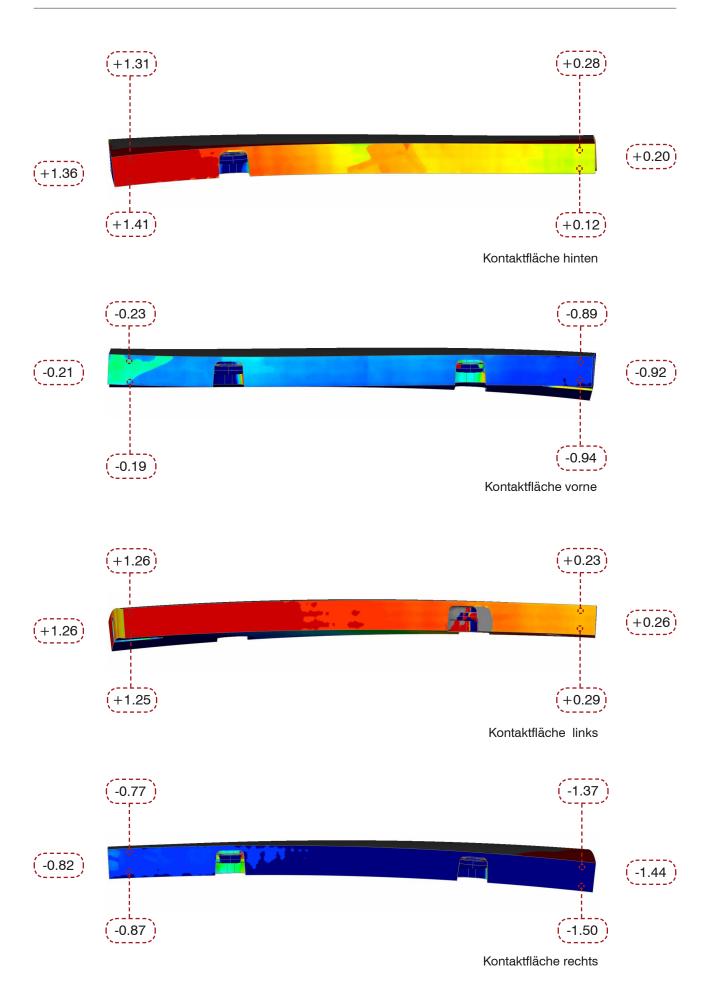


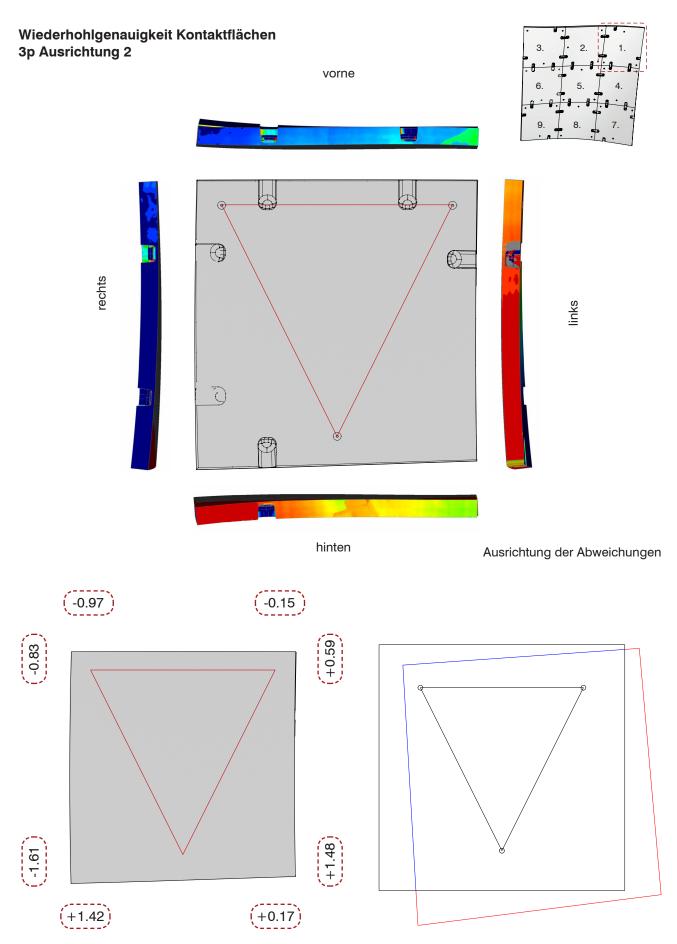
Abweichungen 3p Ausrichtung	in %	Abweichungen Best-Fit Ausrichtung	in %
>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	26.5 5.70 5.58 4.00 5.06 4.56 13.8 4.00 4.26 4.05 3.71 4.26 13.5	>-1.00mm -1.000.85mm -0.850.70mm -0.700.55mm -0.550.40mm -0.400.25mm -0.25 - +0.25mm -0.25 - +0.40mm +0.40 - +0.55mm +0.55 - +0.70mm +0.70 - +0.85mm +0.85 - +1.00mm >+1.00mm	12.1 5.02 4.21 5.59 7.78 15.2 40.2 3.16 1.91 1.36 0.98 0.65 1.86
+1.00 +0.25 -0.25	-1.00	+1.00 +0.25 -0.25	-1.00



Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

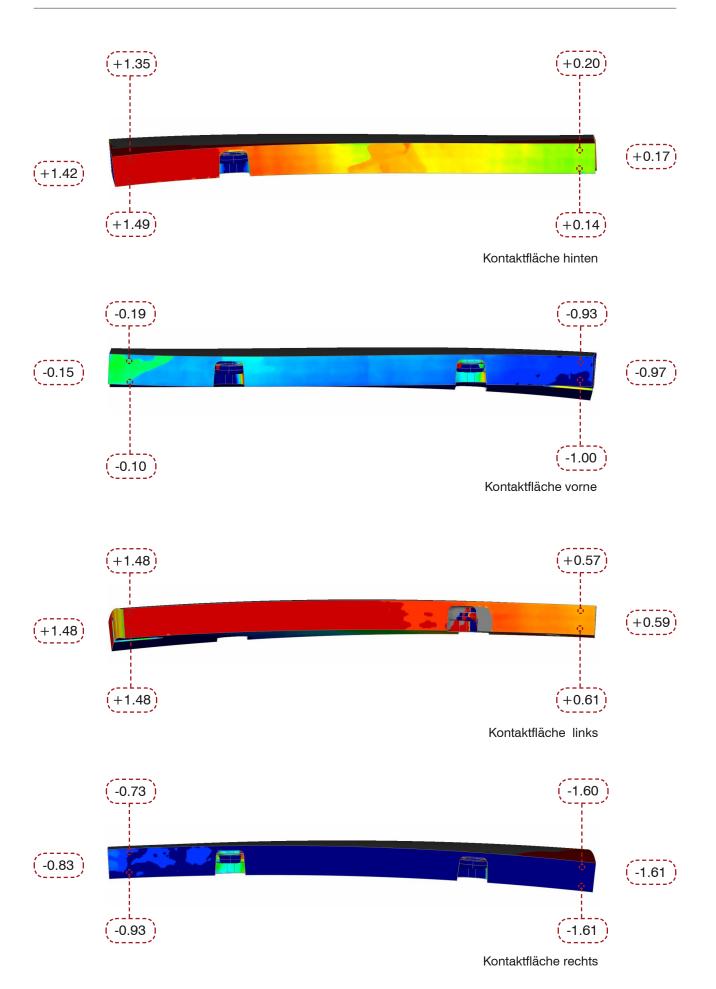
Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

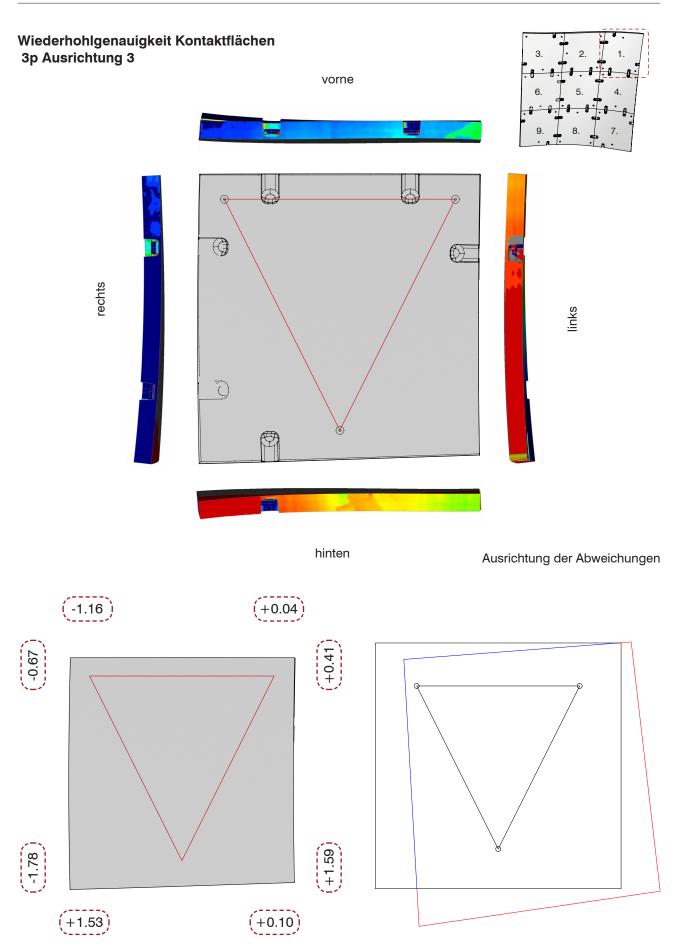




Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

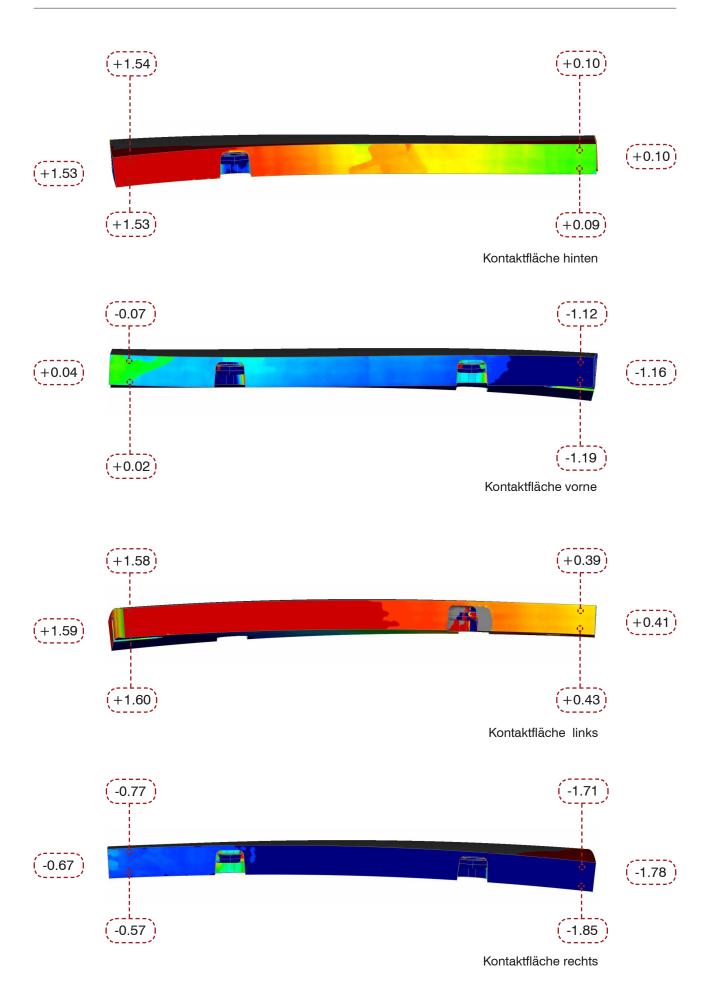
Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

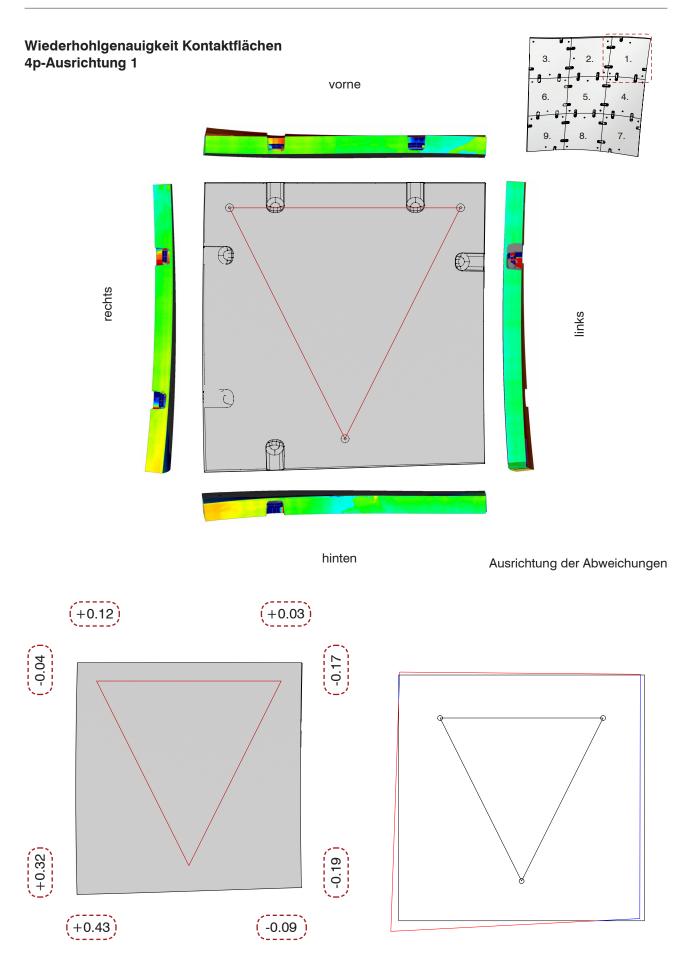




Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

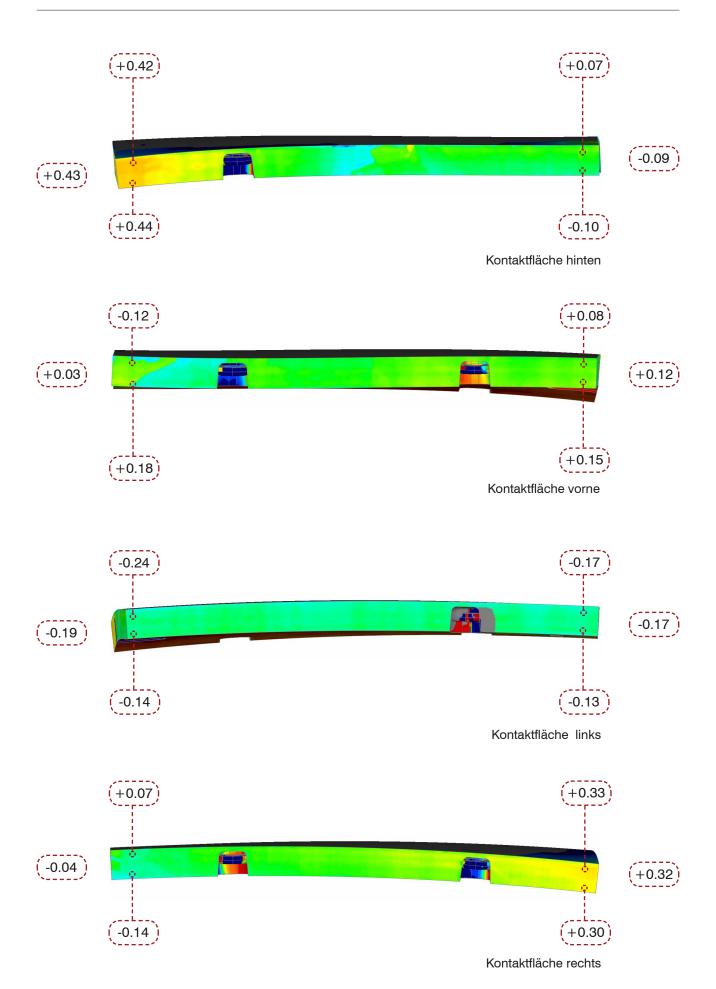
Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

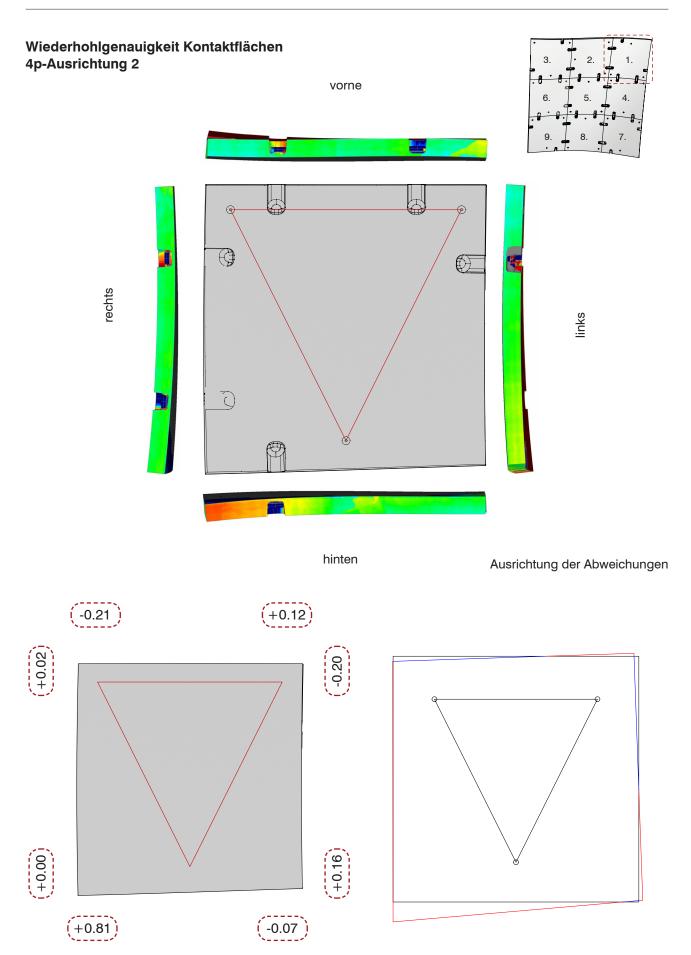




Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

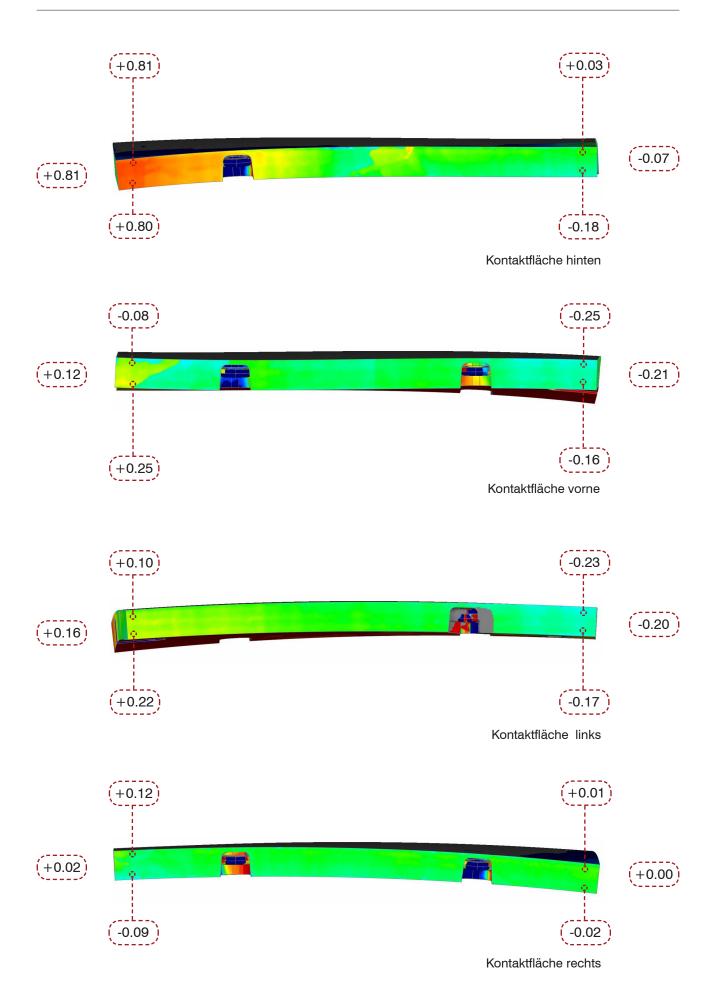
Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

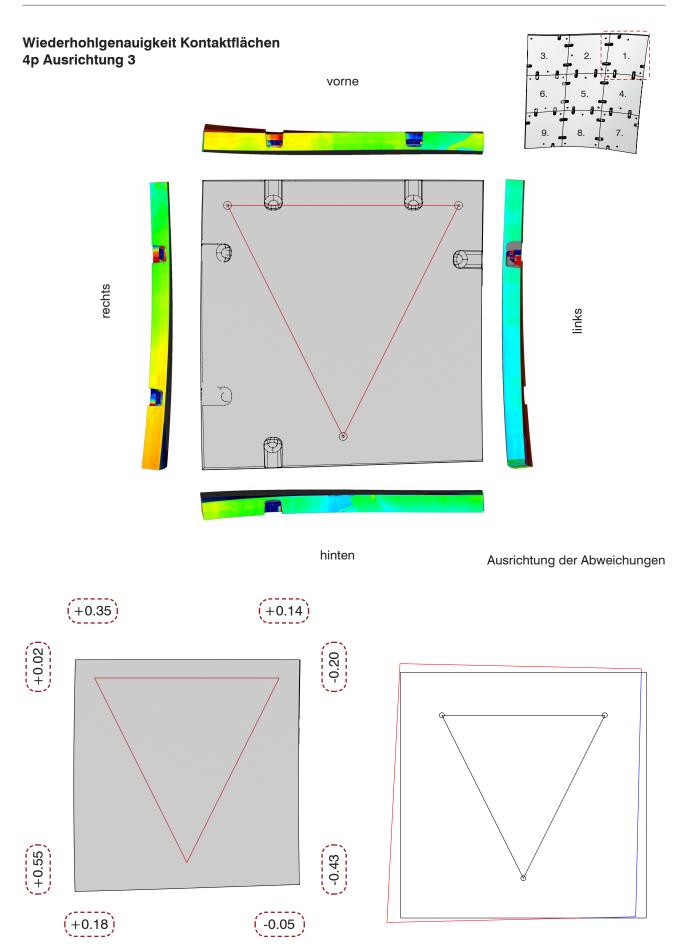




Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

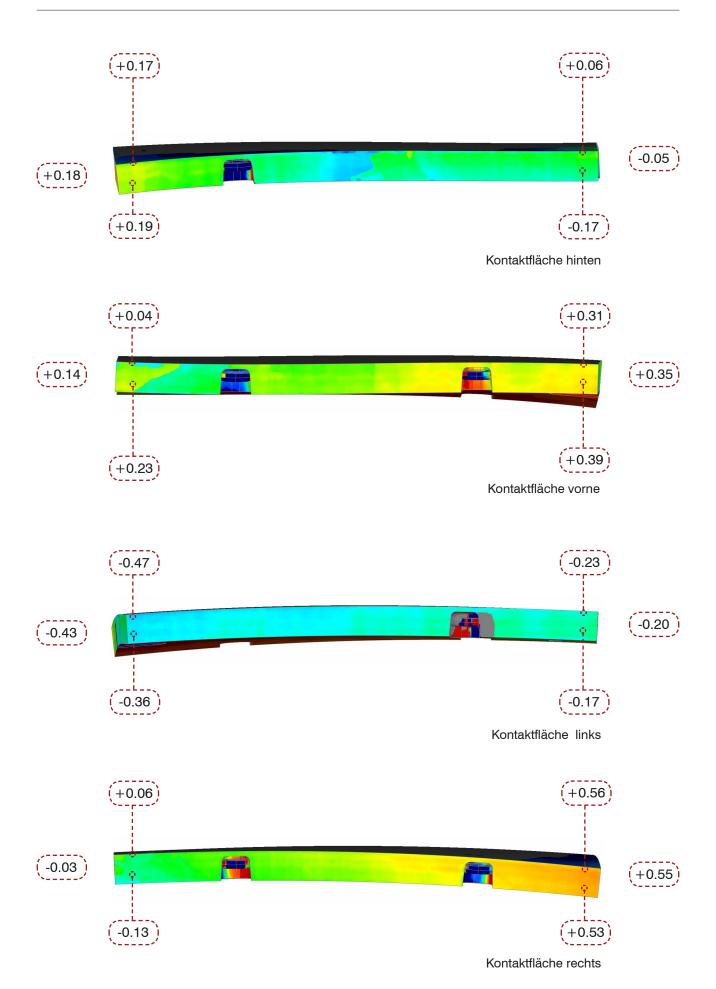
Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen





Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen



<b>Abweichungen</b>	3p Ausrichtung

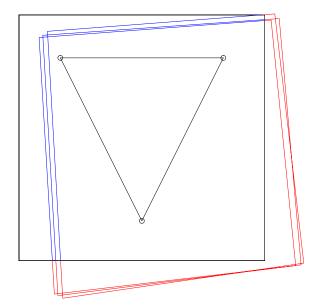
Pos. 1		Pos. 2	Pos. 3		Pos. 4
1 2 3	-0.92 -0.97 -1.16	1 2 3	-0.21 1 -0.15 2 +0.04 3	+0.26 +0.59 +0.41	1 (+1.26) 2 +1.48 3 (+1.59)
Mittelwert	-1.02		-0.13	+0.42	(+1.44)
Abweichung	±0.14		±0.17	<u>±0.17</u> )	±0.15
Pos. 5		Pos. 6	Pos. 7		Pos. 8
Pos. 5 1 2 3	+0.20 +0.17 +0.10	Pos. 6 1 2 3	Pos. 7  +1.36 +1.42 +1.53	-1.44 -1.61 -1.78	Pos. 8  1
1 2	+0.17	1 2	(+1.36) 1 +1.42 3	<u>-1.44</u> <u>-1.61</u>	1 (-0.82) 2 -0.83

### Abweichungen 4p-Ausrichtung

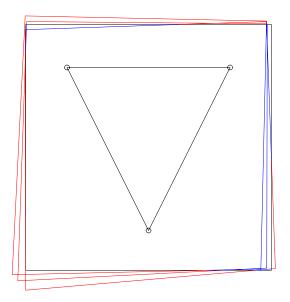
Pos. 1 1 2 3	+0.12 -0.21 +0.35	Pos. 2  1 2 3	+0.03 +0.12 +0.14	Pos. 3 1 2 3	-0.17 -0.20 -0.20	Pos. 4 1 2 3	-0.19 +0.16 -0.43
Mittelwert	+0.09		+0.01		-0.18		-0.15
	±0.30		±0.06		±0.06		±0.06
Pos. 5		Pos. 6		Pos. 7		Pos. 8	
1 2 3	-0.09 -0.07 -0.05	1 2 3	+0.43 (+0.81) +0.18	1 2 3	+0.32 +0.00 +0.55	1 2 3	-0.04 +0.02 +0.02
Mittelwert	-0.07		+0.47		+0.29		+0.00
Abweichung	±0.06		±0.31		±0.29		±0.04

### Abweichungen 4p gegen 8p-Ausrichtung

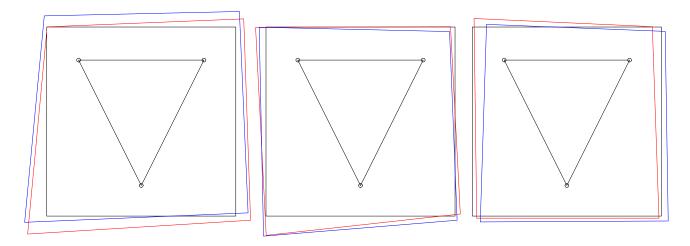
Po	s. 1 - 6		Pos	2 - 5		Po	s. 3 - 8		Pos	. 4 - 7	
	4p	8p		4p	8p		4p	8p		4p	8p
1	+0.99	+0.92	1	+0.65	+0.65	1	+0.40	+0.32	1	+1.79	+1.72
2	+0.99	+1.06	2	-0.09	-0.07	2	+0.31	+0.12	2	+0.27	+0.24
3	+0.56	+0.45	3	+0.13	+0.03	3	-0.57	-0.55	3	-0.26	-0.08
Ab	weichung	-0.11			-0.10			-0.19			+0.18



Charakterisierende Überlagerung der Abweichungen bei der 3p Ausrichtung



Charakterisierende Überlagerung der Abweichungen bei der 4p-Ausrichtung



Überlagerung 4p-Ausrichtung (rot) zu 8p-Aurichtung (blau) Schalenelemente Nr. 1 - 3

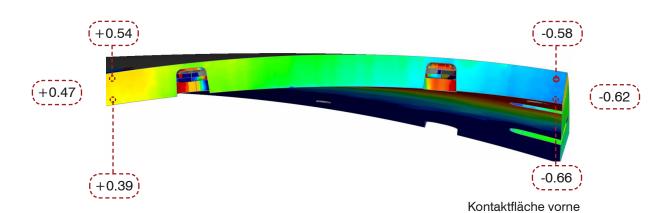
## Kontaktflächen Schalenelement 1 **3p Ausrichtung** vorne 面 1 rechts links (D) hinten Ausrichtung der Abweichungen (+0.54) (-0.62) (+0.45) (+0.07) (+1.42)

Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

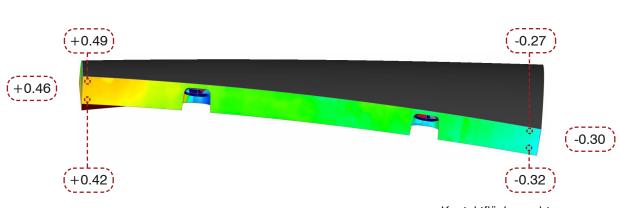
Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen



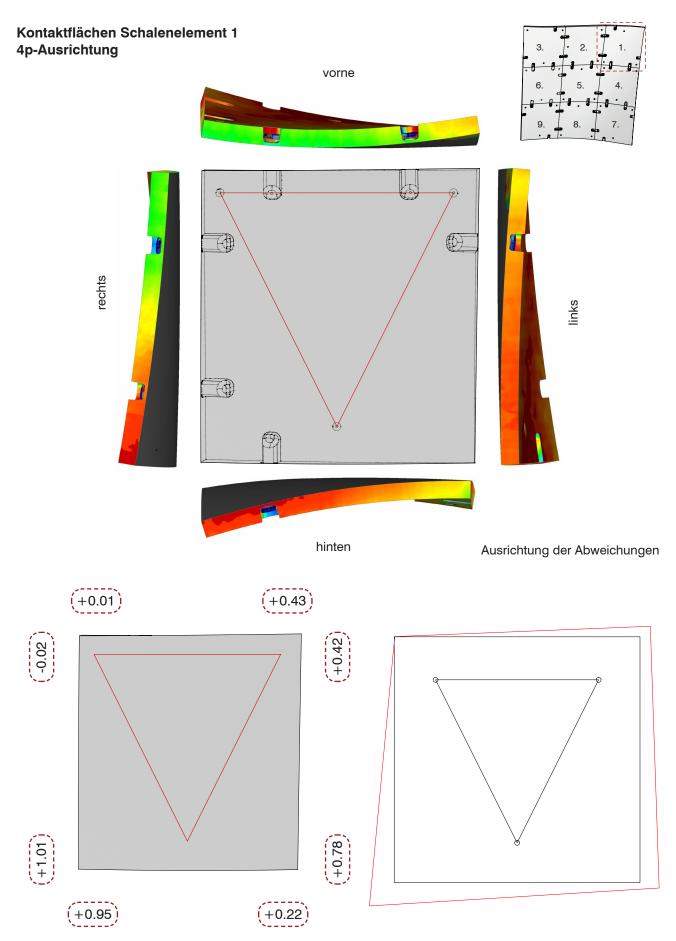
Kontaktfläche hinten





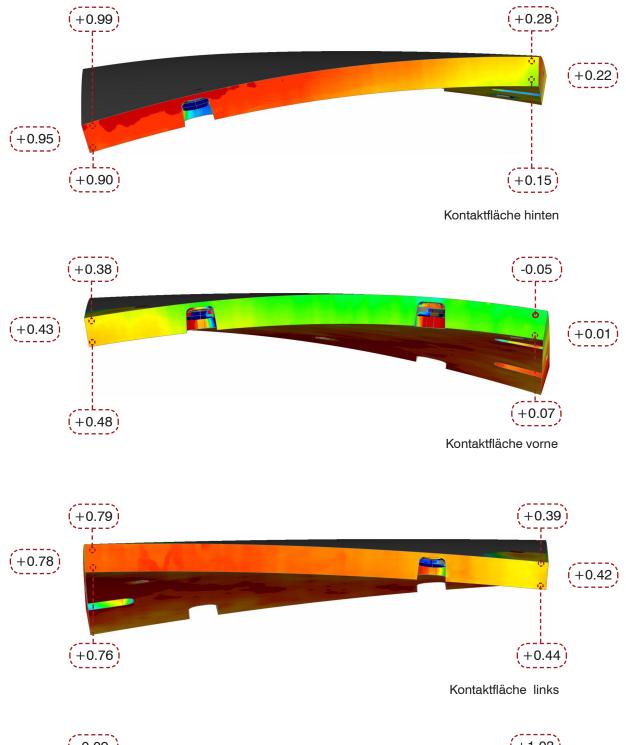


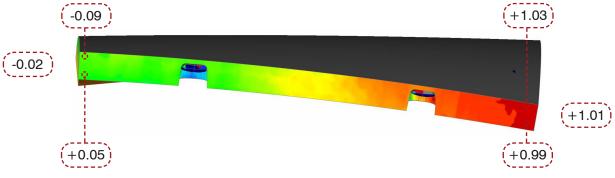
Kontaktfläche rechts



Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

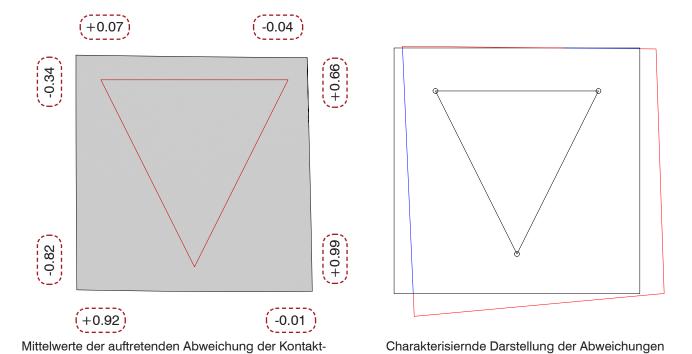
Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen





Kontaktfläche rechts

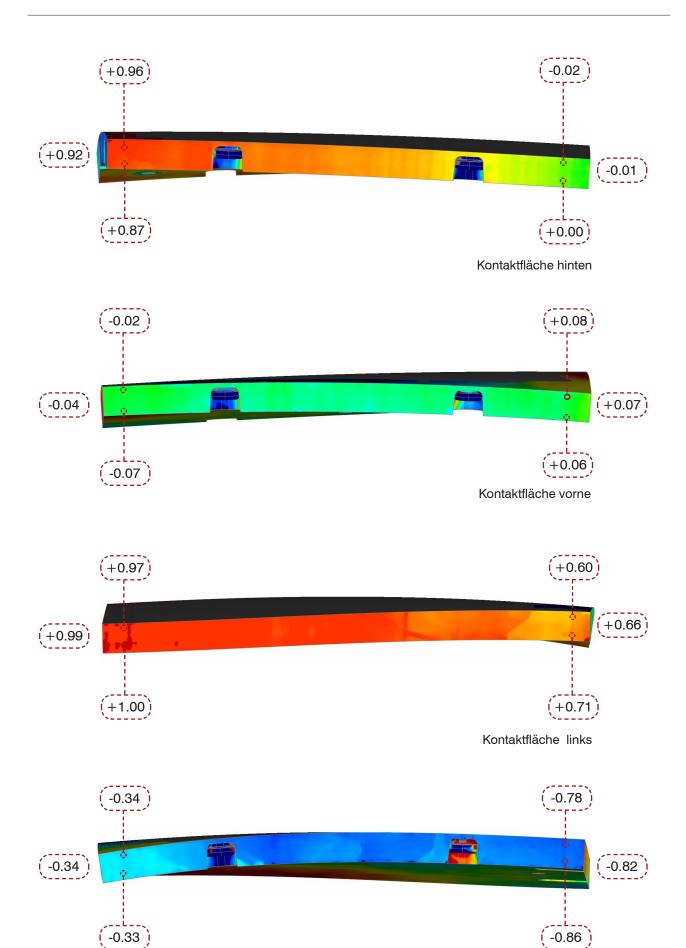
## Kontaktflächen Schalenelement 2 3p Ausrichtung vorne skuij sku



hinten

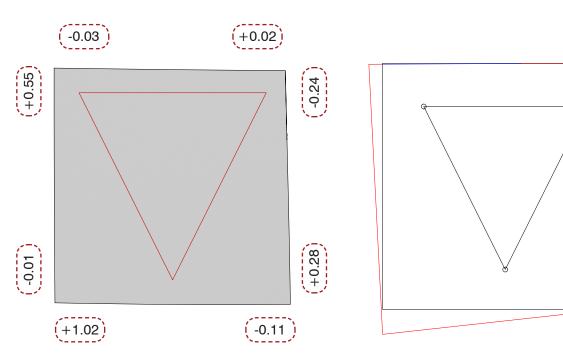
Ausrichtung der Abweichungen

flächen



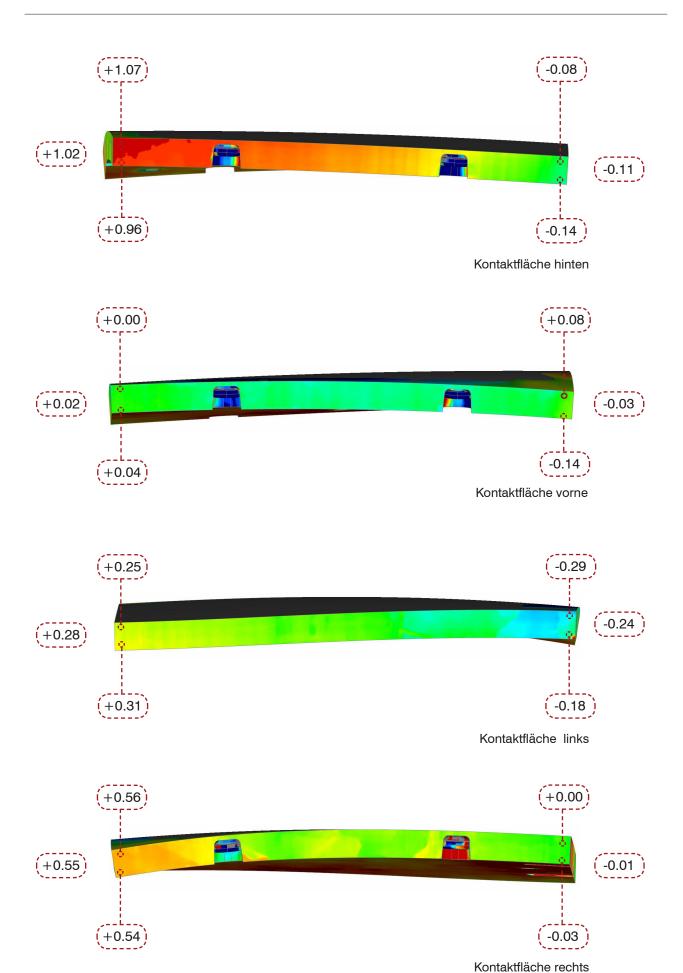
Kontaktfläche rechts

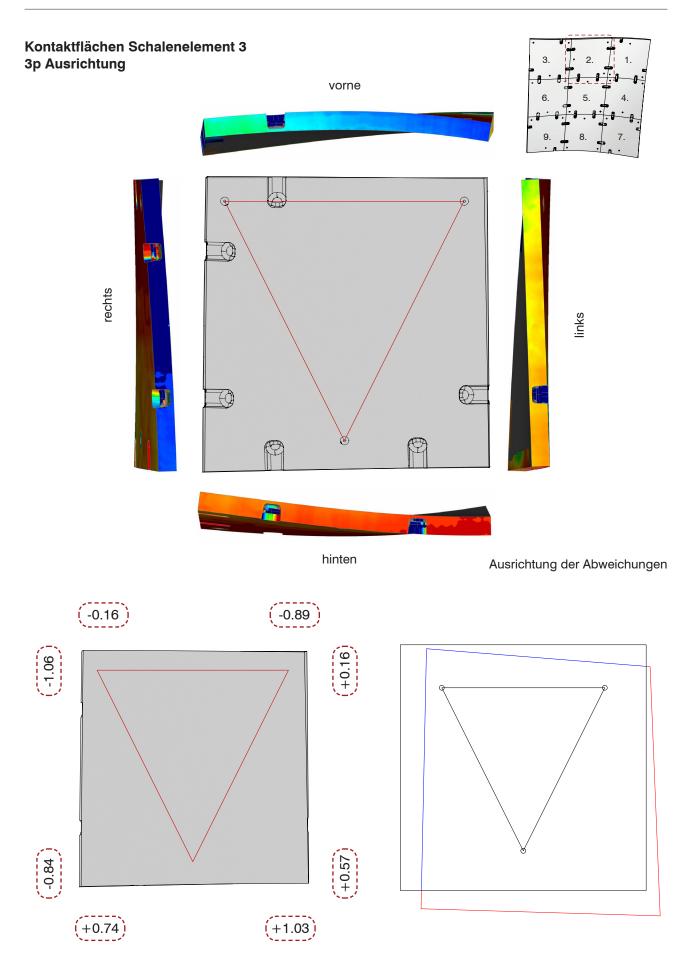
# Kontaktflächen Schalenelement 2 4p-Ausrichtung vorne stype stype hinten Ausrichtung der Abweichungen



Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

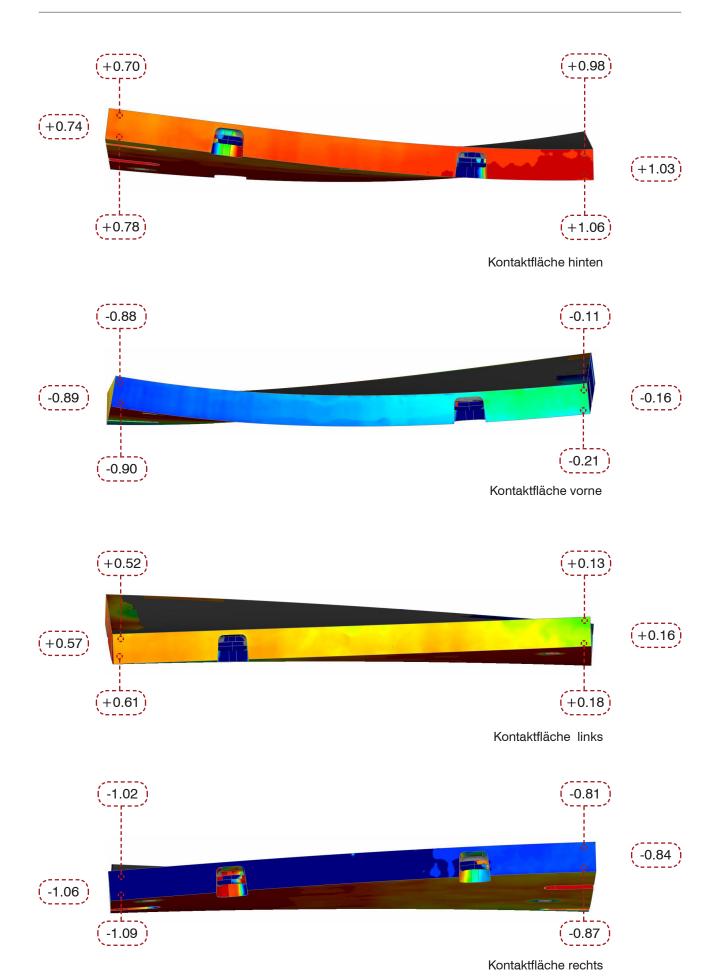
Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

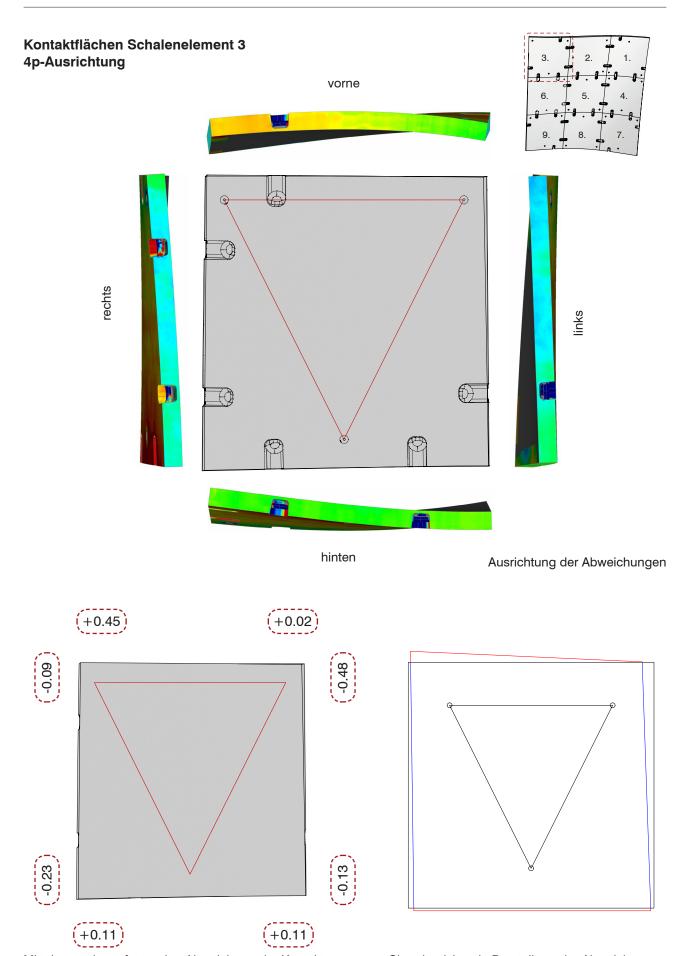




Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

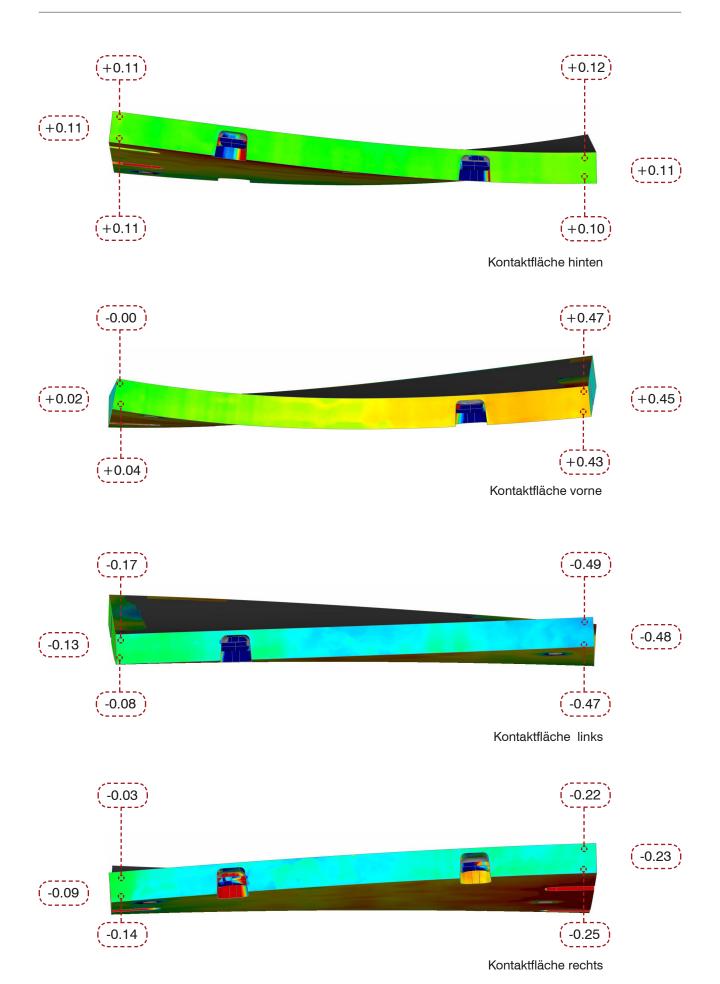
Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

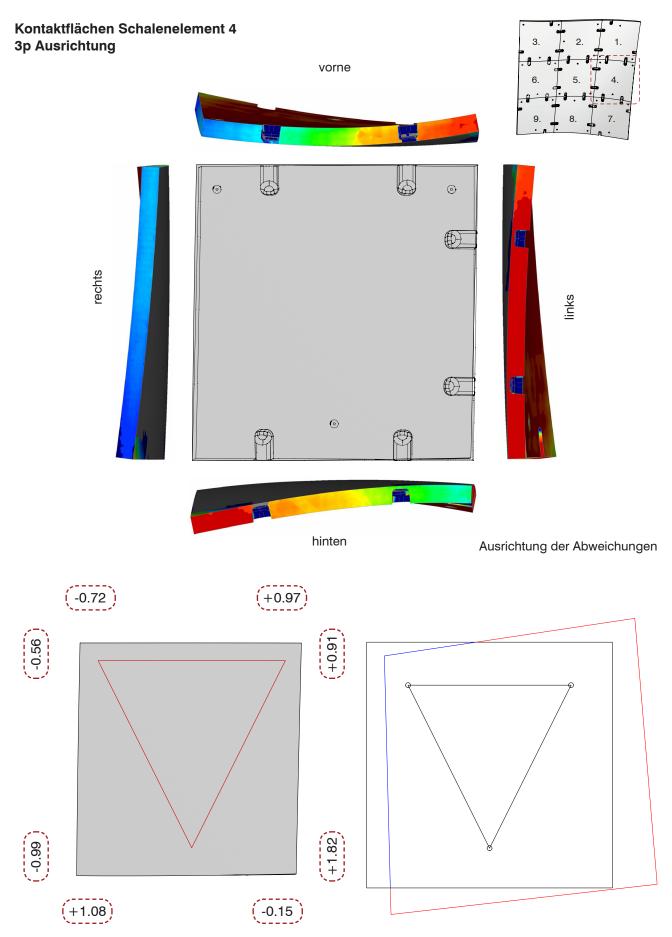




Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

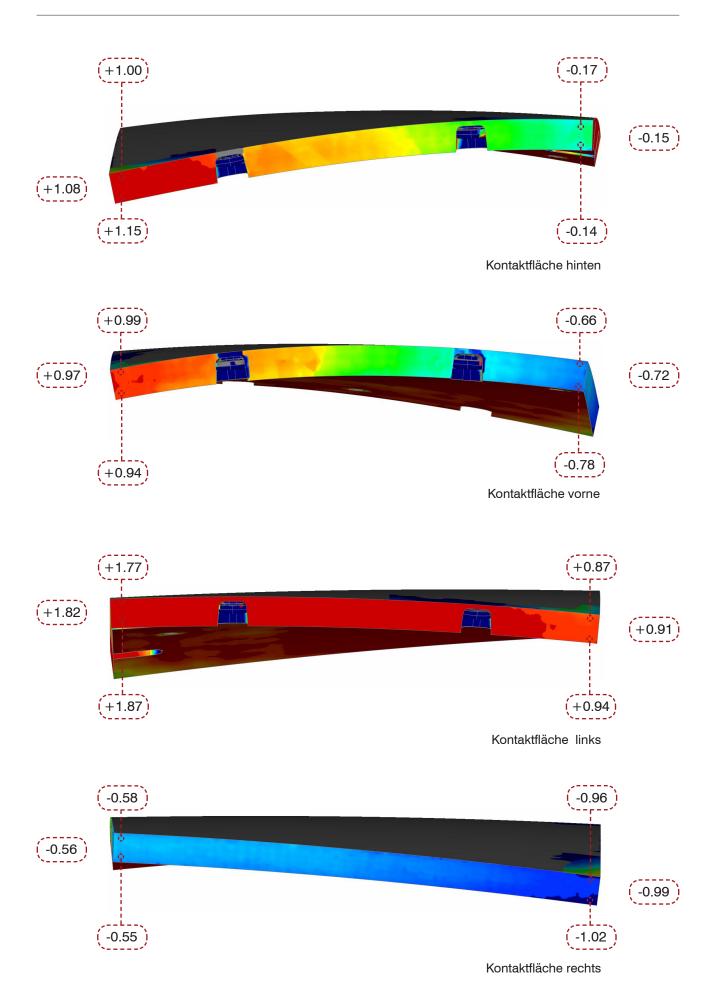
Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

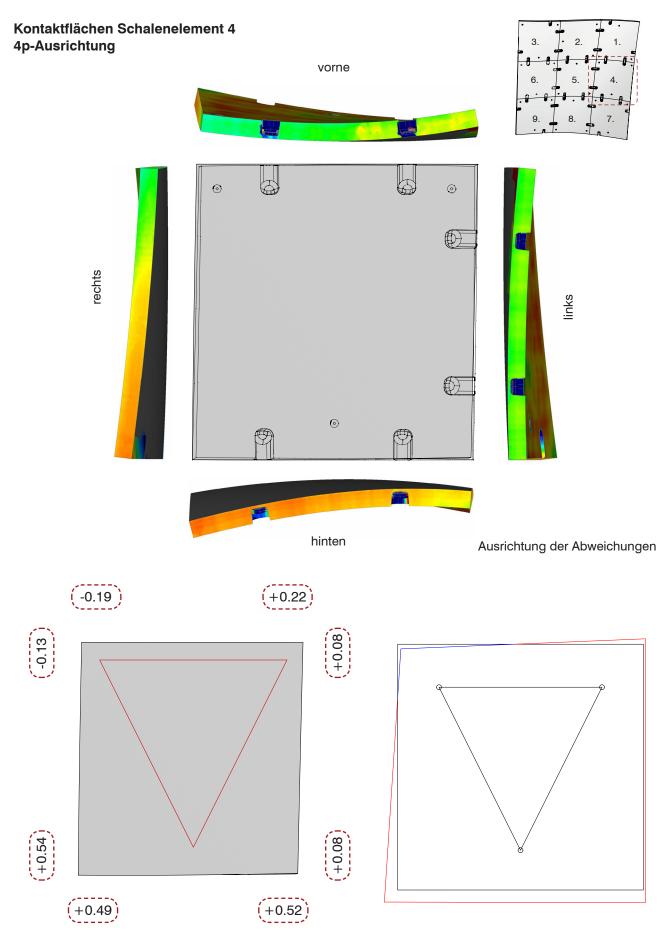




Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

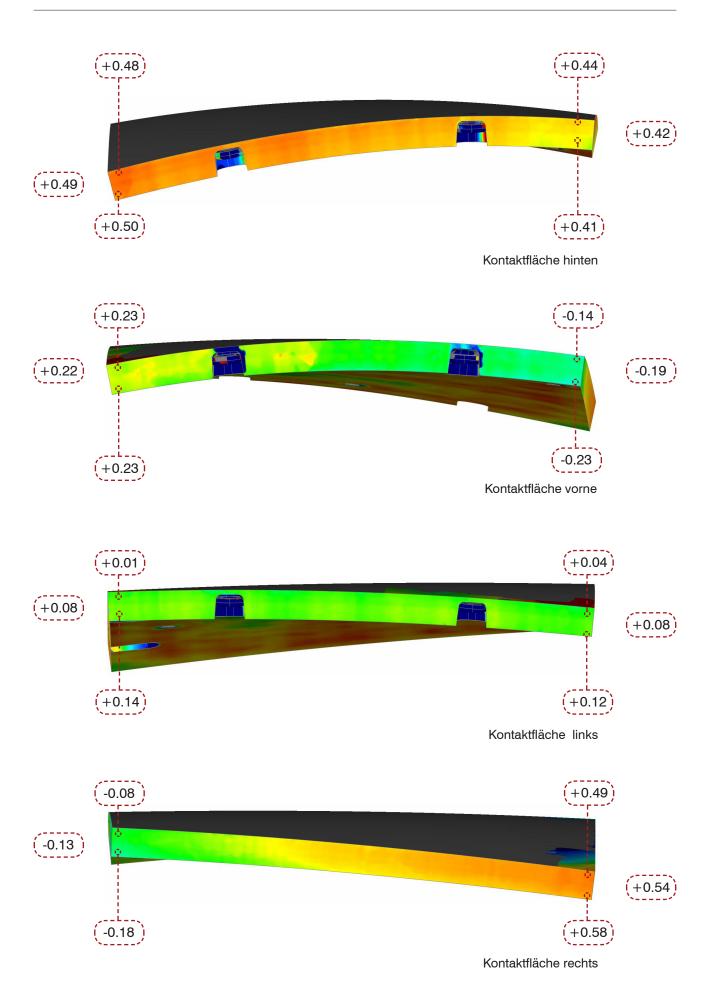
Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

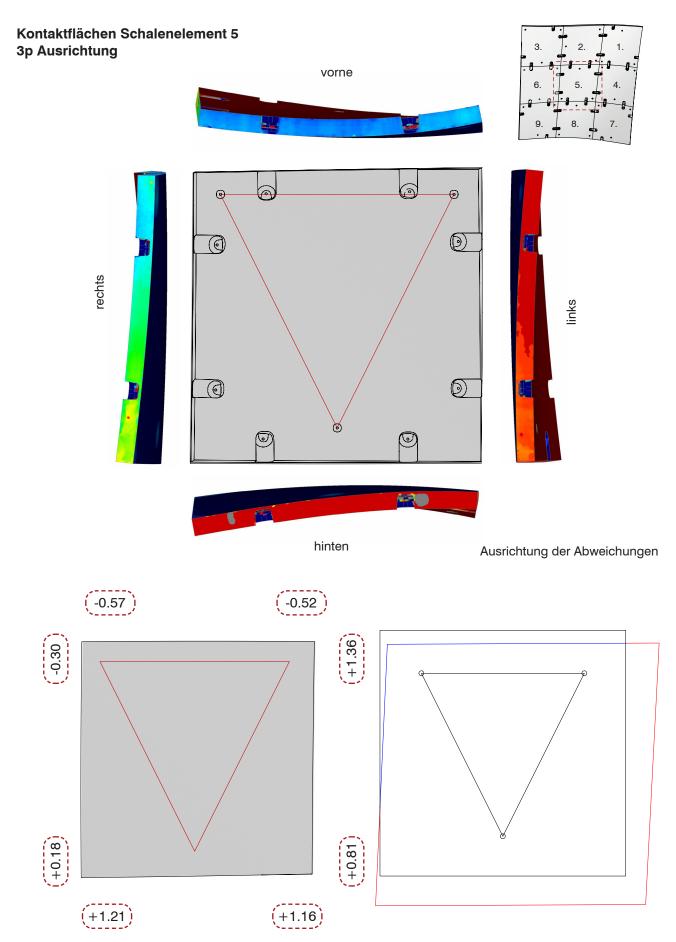




Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

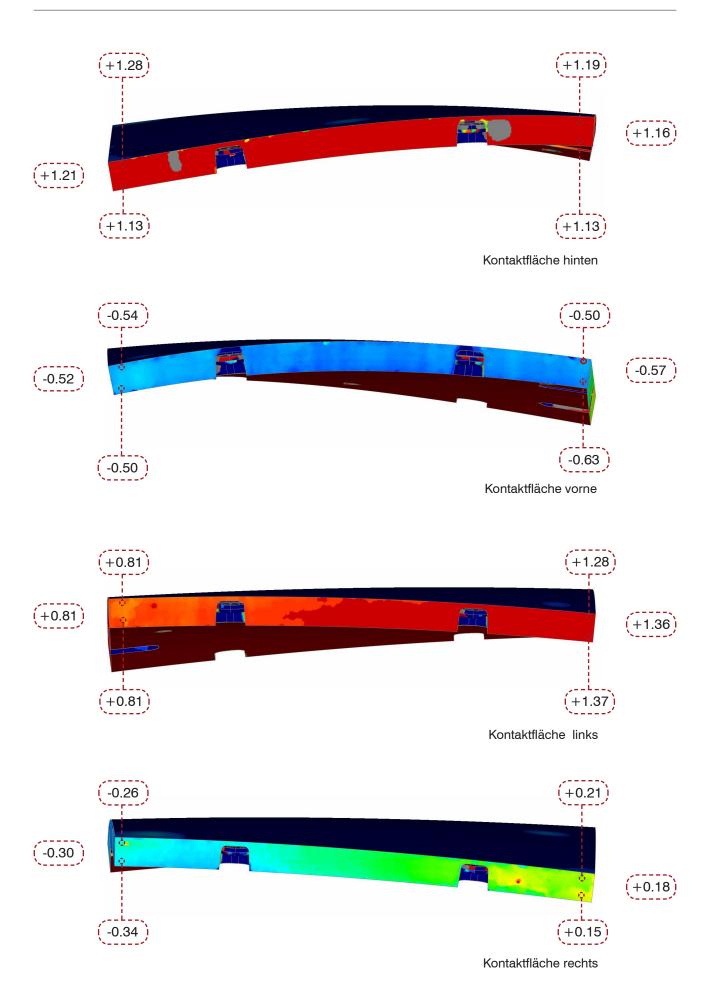
Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

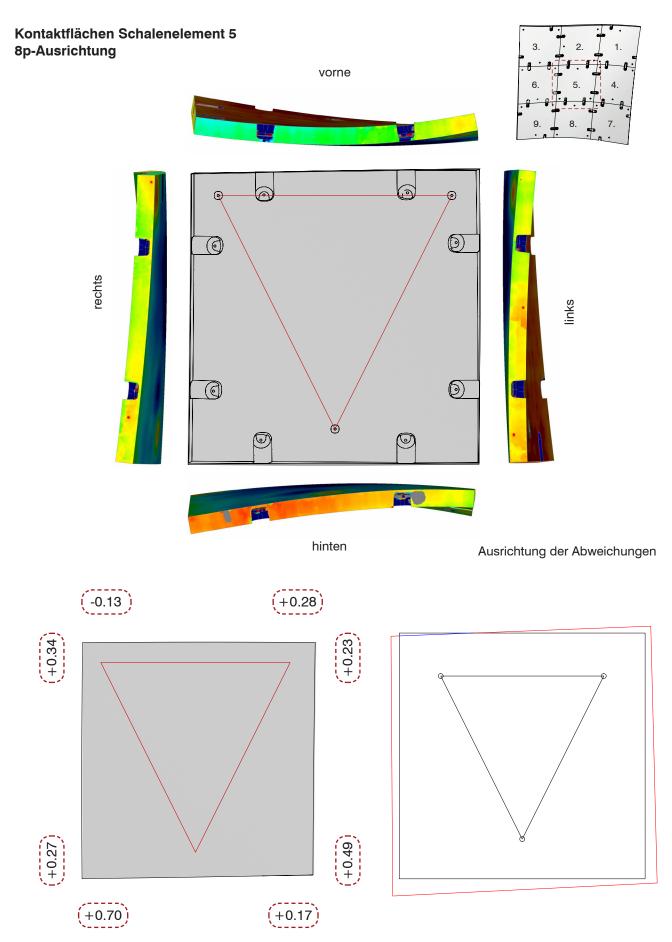




Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

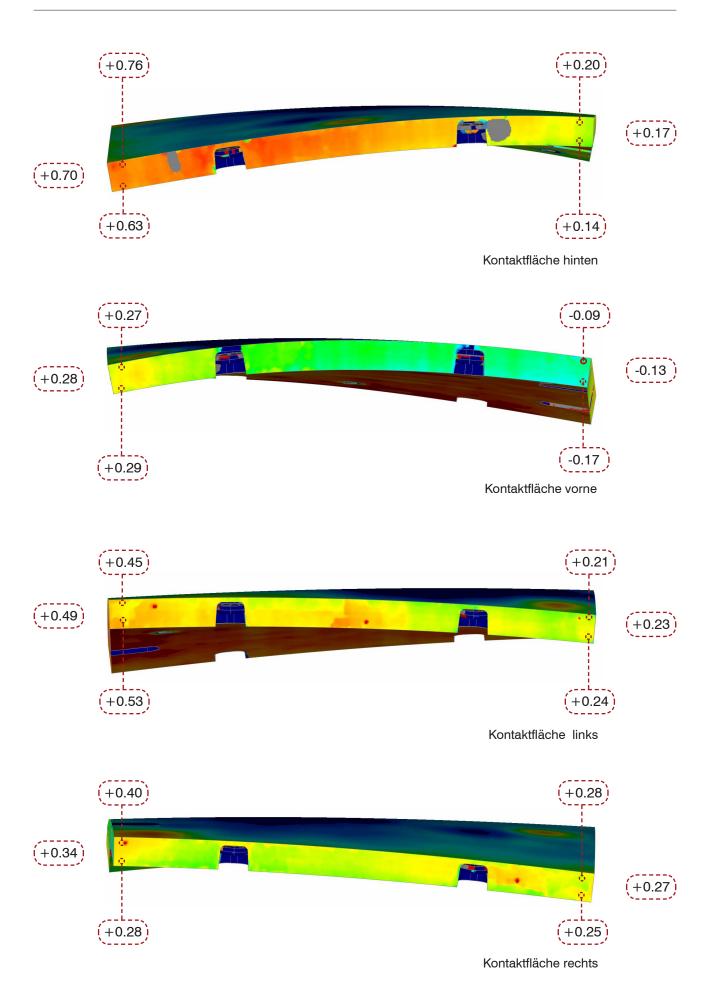
Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

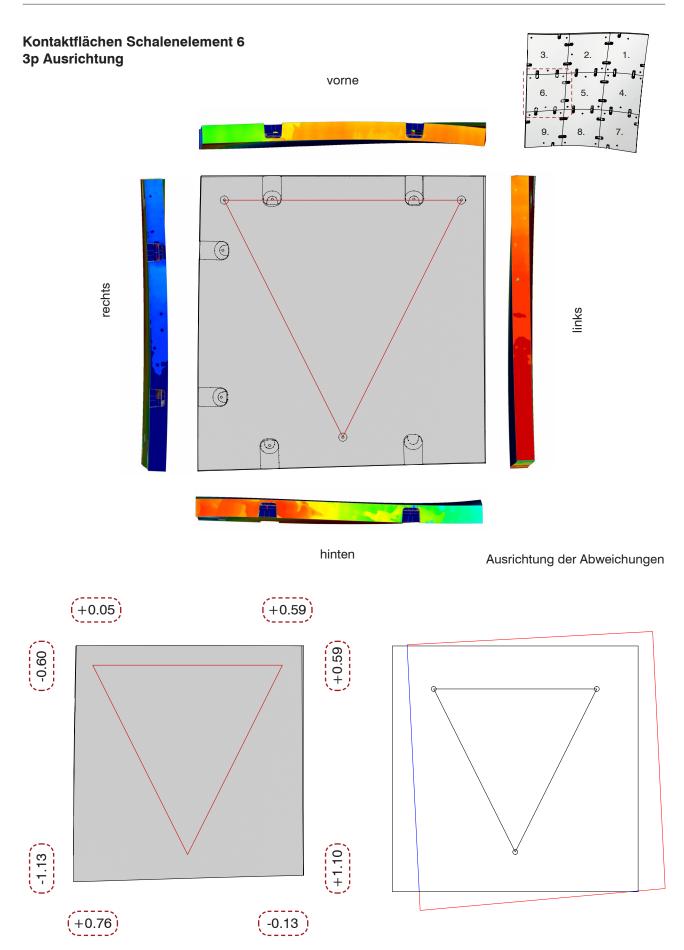




Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

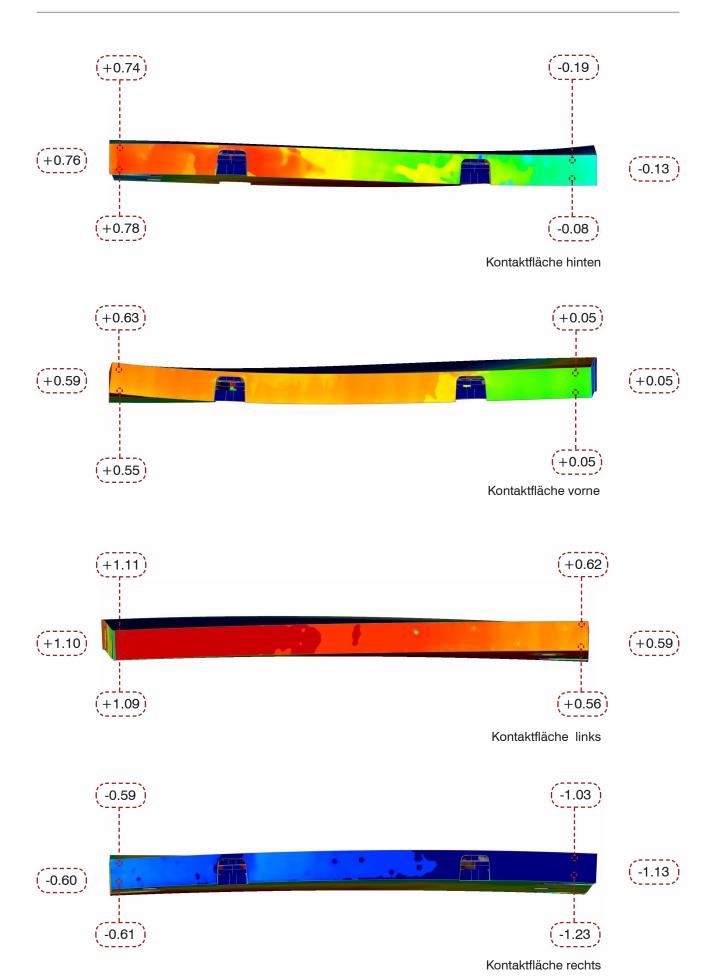
Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

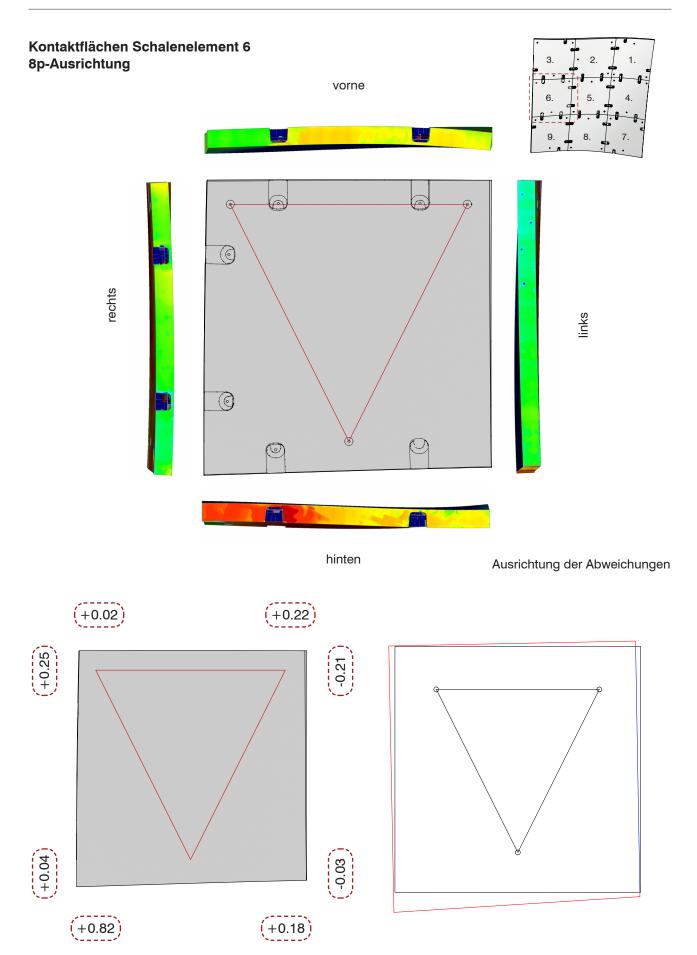




Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

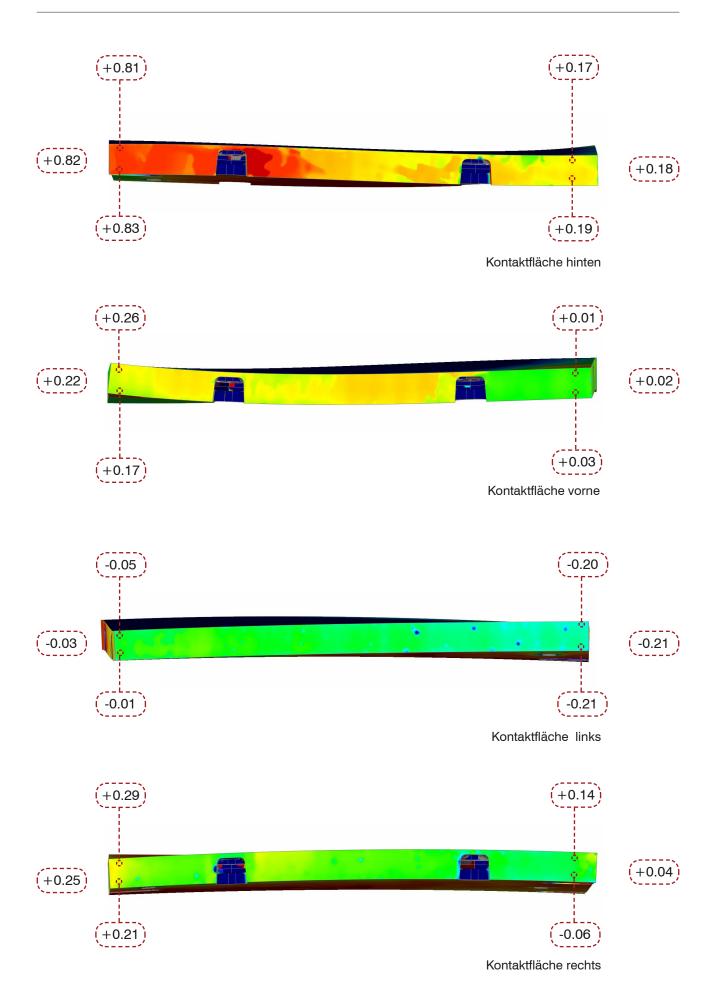
Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

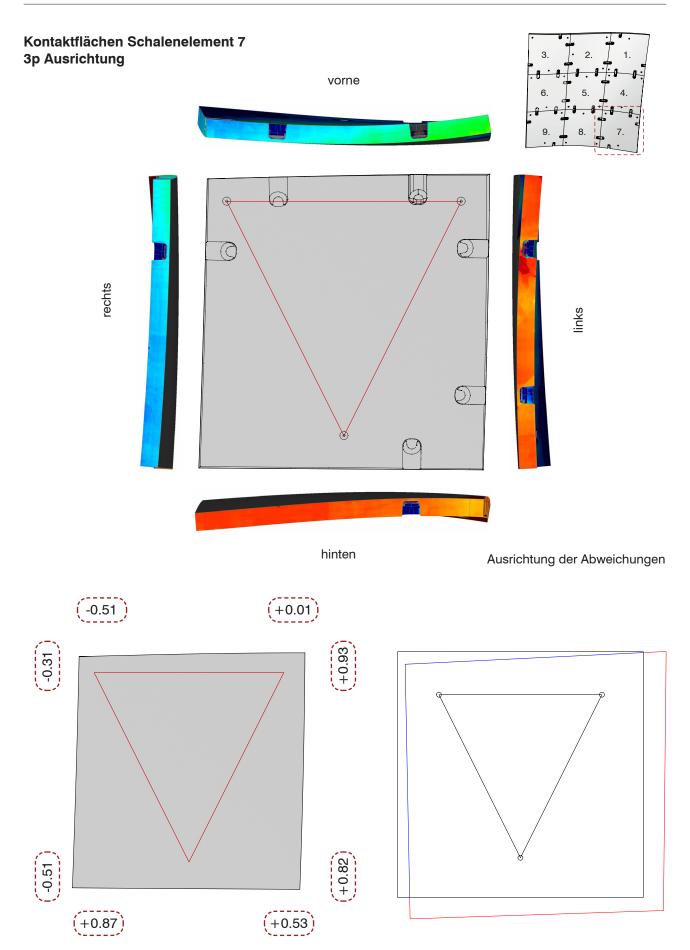




Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

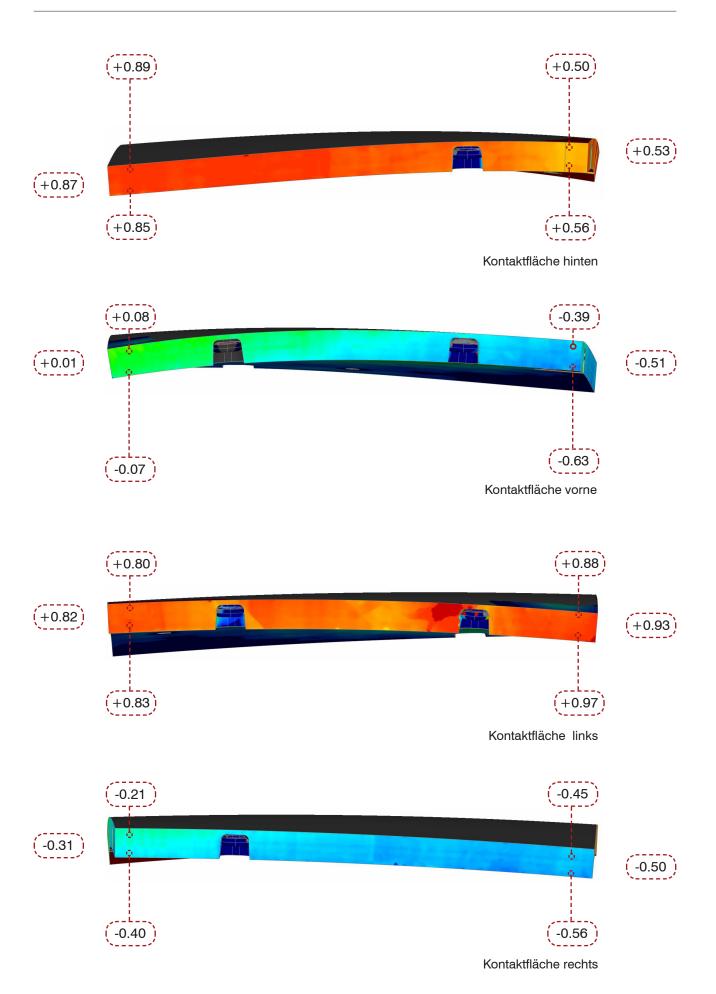
Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

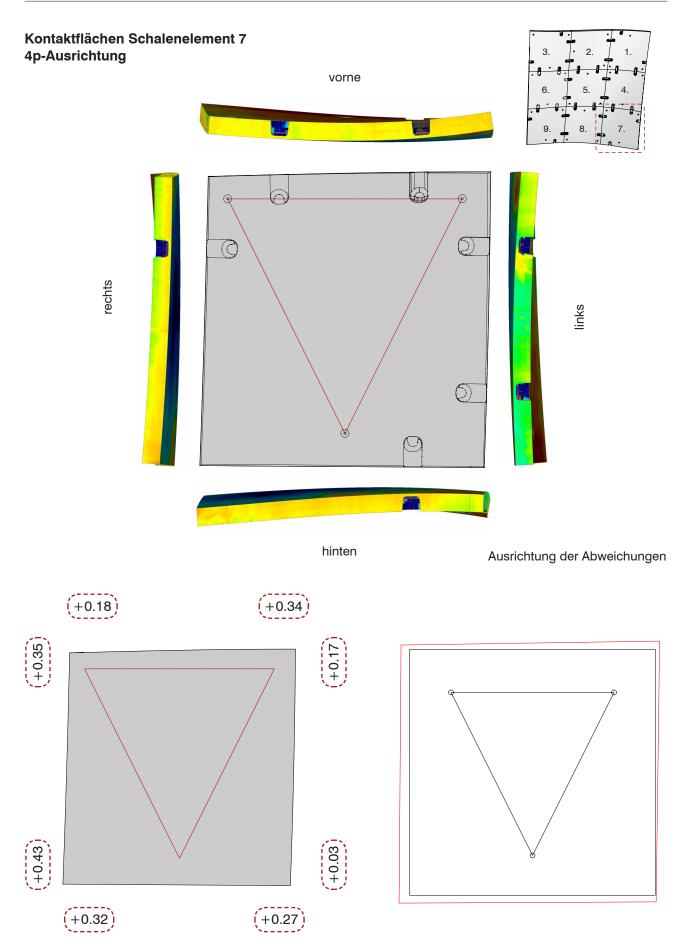




Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

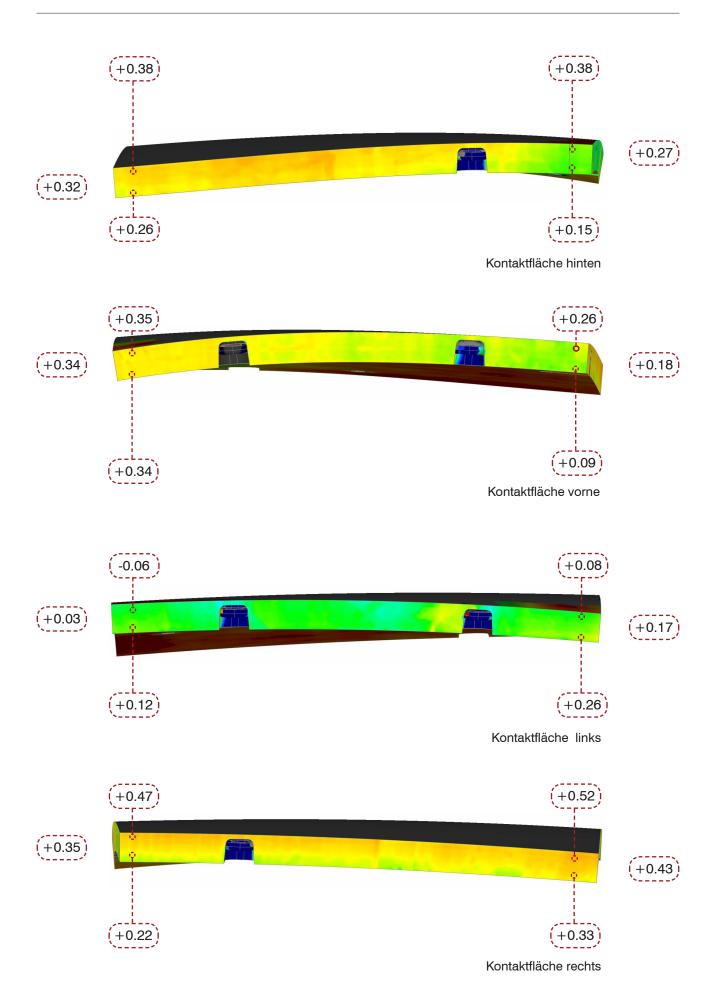
Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

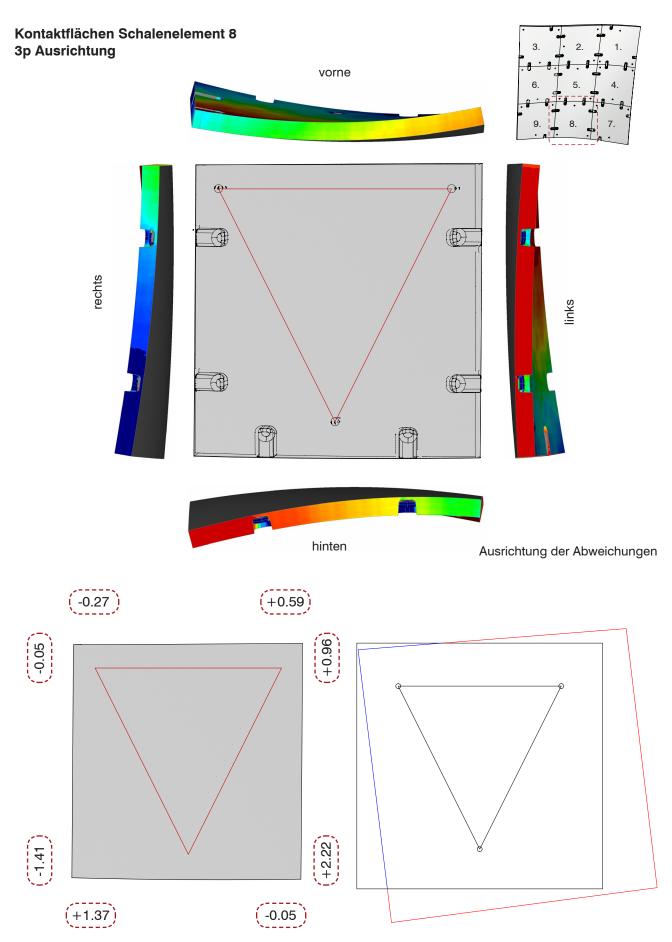




Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

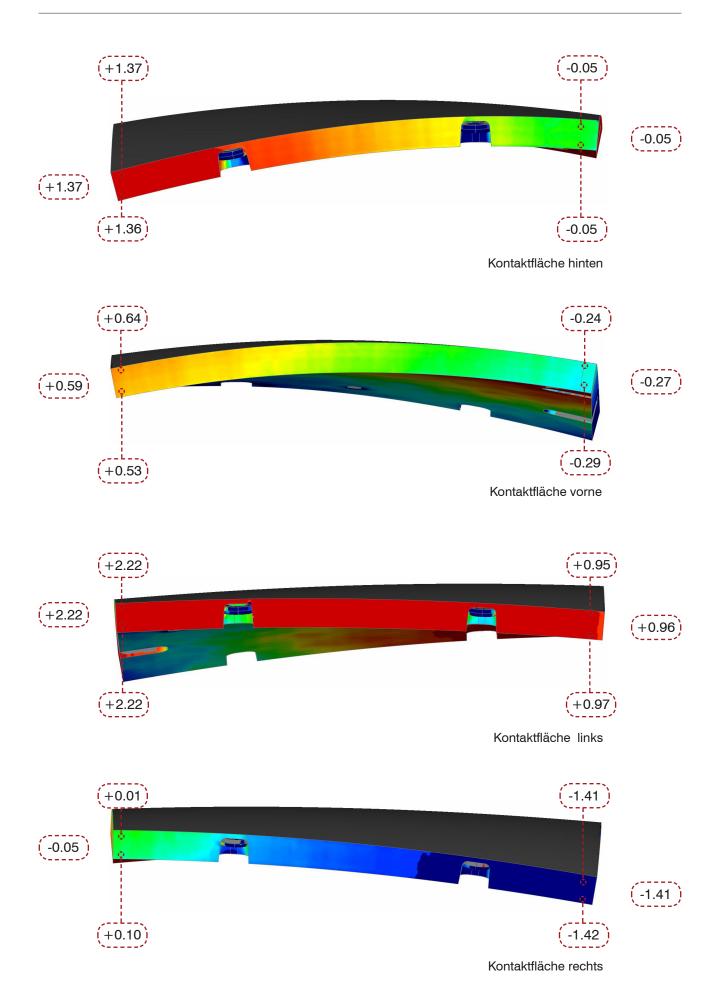
Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

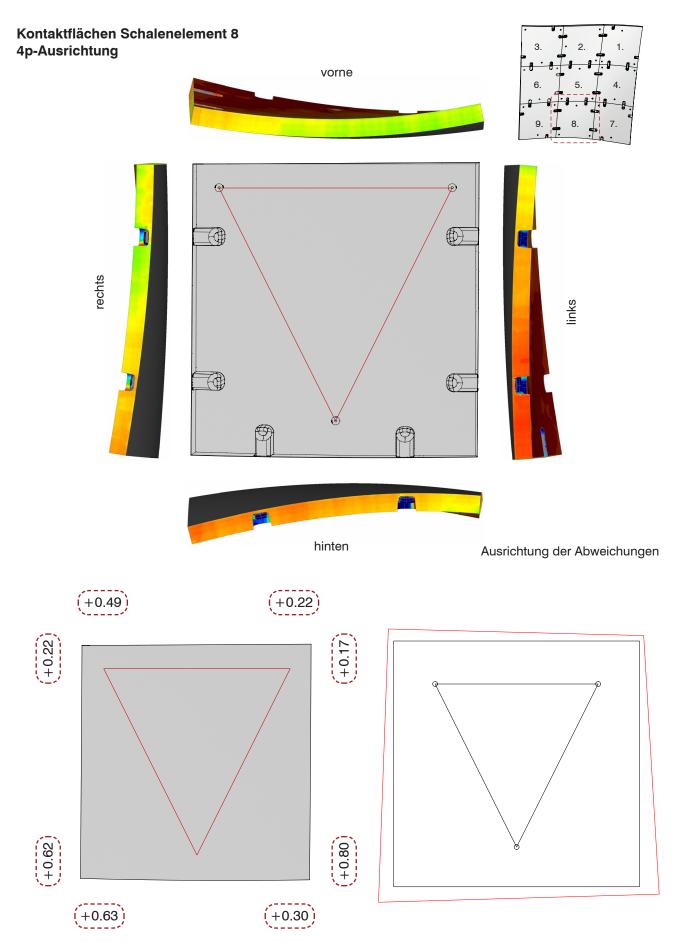




Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

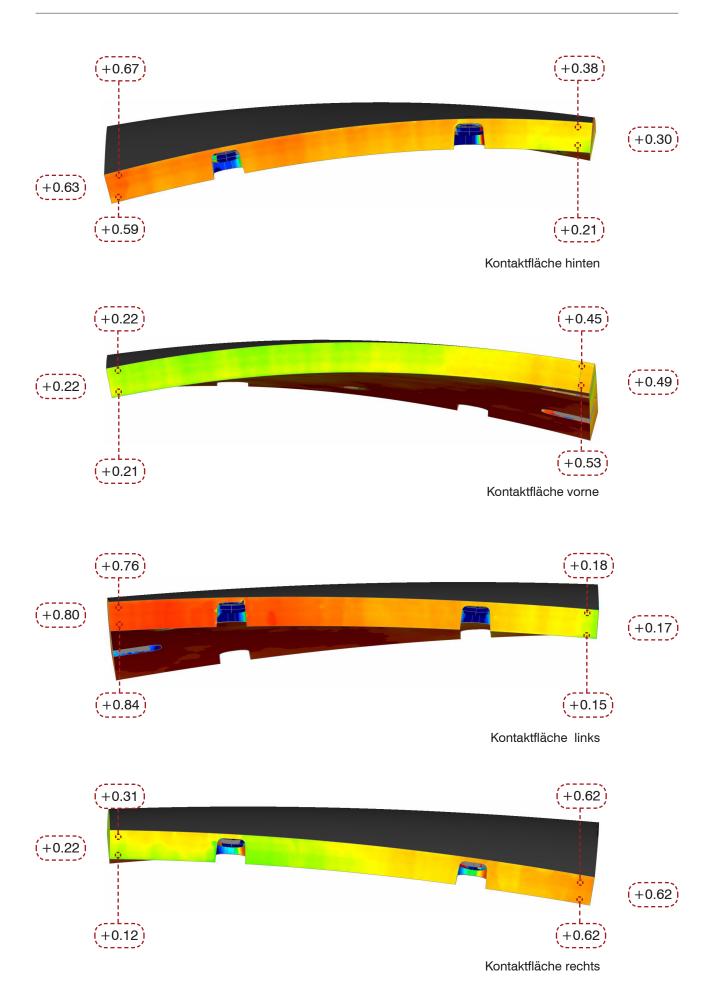
Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

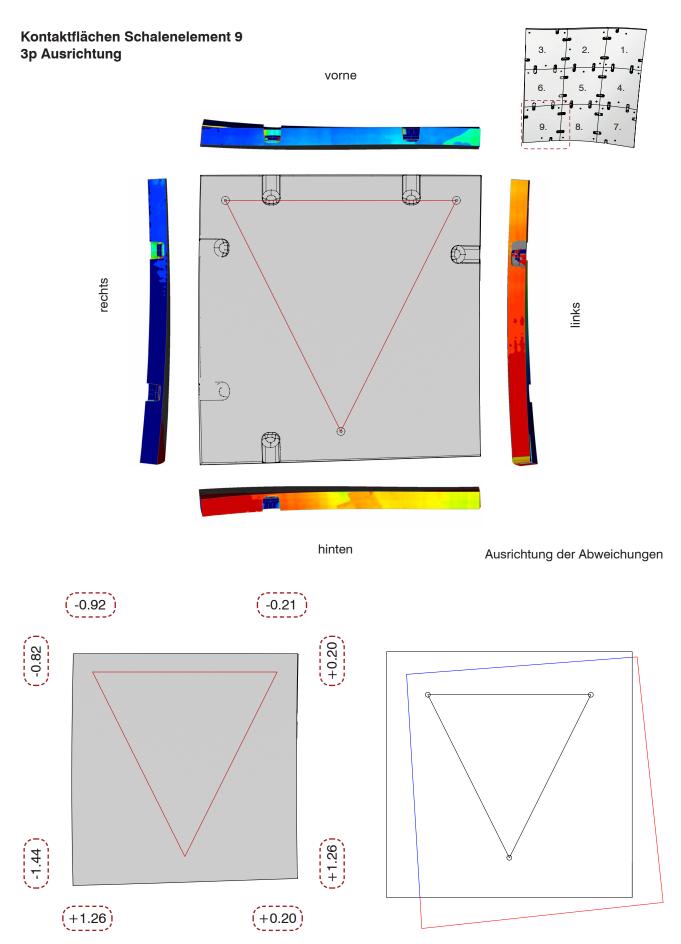




Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

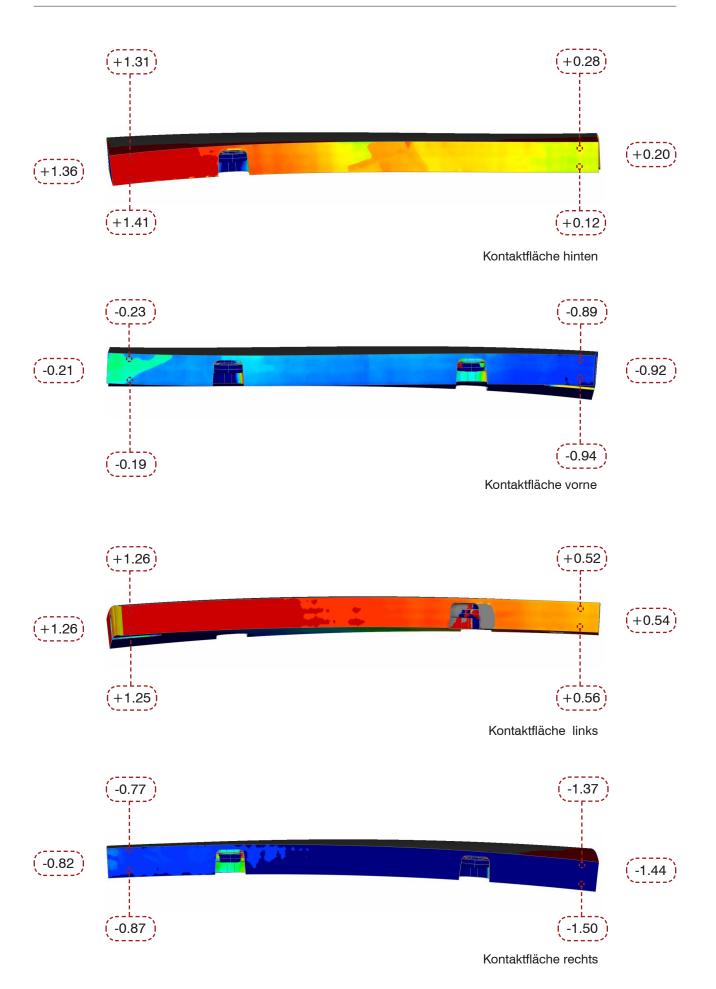
Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

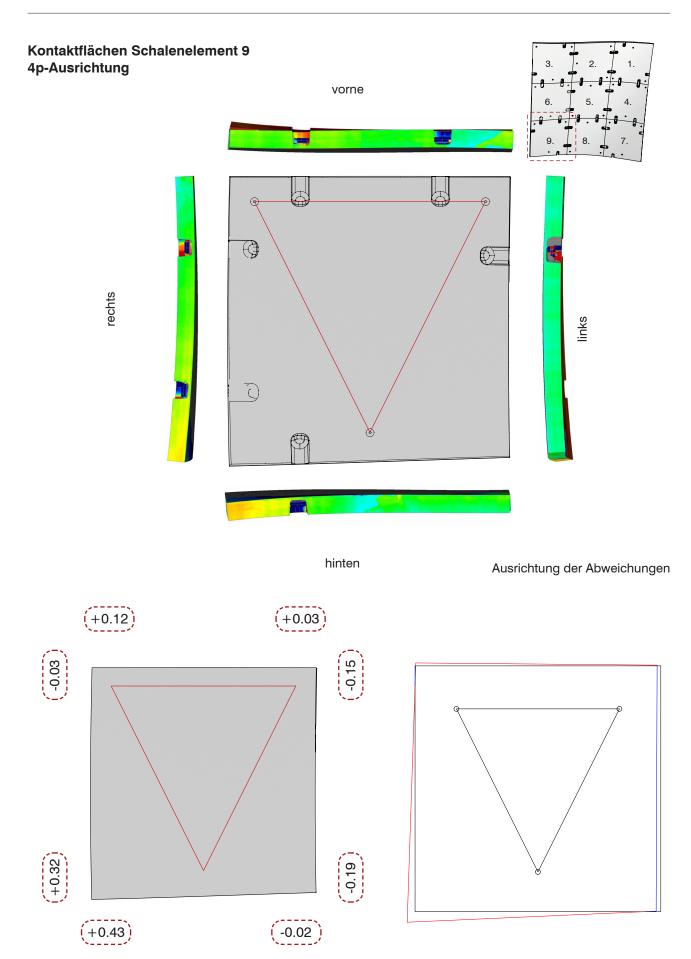




Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen





Mittelwerte der auftretenden Abweichung der Kontaktflächen

Charakterisiernde Darstellung der Abweichungen

