

# Verformungsgerechtes Aufmaß in einem BIM

Christian Thurner  
Ingenieurgesellschaft Gemmer und Leber mbH  
Julius- Echter- Str. 1  
97440 Werneck  
thurner@igl-online.de

Thomas Wunderlich  
Lehrstuhl für Geodäsie, TUM  
Arcisstraße 21  
80290 München  
th.wunderlich@tum.de

## 1 Probleme der Integration verformungsgerechter Aufmäße in ein CAD als zentralem geometrischen Anteil eines BIM

Laut United States National Institute for Building Science (NIBS, 2007) ist BIM wie folgt definiert:

*„Building Information Modeling (BIM) is an improved planning, design, construction, operation, and maintenance process using a standardized machine-readable information model for each facility, new or old, which contains all appropriate information created or gathered about that facility in a format useable by all throughout its lifecycle“*

Dabei spricht der Fachausschuss des NIBS, das National Building Model Standard Project Committee (NBIMS), sogar von BIM als einer Informationsdatenbank rund um das Bauwerk, um eine verlässliche Quelle für Entscheidungen während des gesamten Lebenszyklus zu bieten (NBIMS, 2012).

Wie im BIM - Leitfaden für Deutschland (Egger et al., 2013) zudem beschrieben, wird die BIM Methode tatsächlich als zentrale Verwaltung von möglichst allen projektrelevanten Informationen verwendet. Damit wird BIM noch umfassender angewandt als es die Definition suggeriert. Auch Borrmann (2013) zeigt wie ein Gebäude von der Planung, über die Nutzung und Instandhaltung bis zum Rückbau mit einem BIM beschrieben werden kann. Dafür werden sowohl die semantischen- (z.B. für die Mengen-, und Kostenberechnung), als auch die dreidimensionalen geometrischen Informationen der Bauteile genutzt. Von besonderer Bedeutung sind darüber hinaus jene im BIM abgebildeten Bauteileigenschaften, welche unterschiedlichste Abfragen – wie beispielsweise thermische Isolation – bis zu Beurteilungen und Optimierungen der Energiebilanz eines Bauwerks erlauben. Im Sinne eines Produktmodells weiß im BIM etwa auch eine Wand, dass sie eine solche ist, welche Fenster sie enthält und stimmt Änderungen sofort ab.

Zu diesen vier, zum Teil verkürzten Definitionen und Beschreibungen, könnten noch beliebig viele ergänzt werden. Alle zeigen, dass BIM als zentraler Datenpool verwendet wird, welcher über dem gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes als zuverlässige Informationsgrundlage für Entscheidungen dienen soll. Dabei kann BIM nicht nur für Neubauten, sondern ebenso für Bestandgebäude angewandt werden.

Nun ist es eigentlich evident, dass sowohl Neubauten als auch Bestandgebäude verformungsgerecht aufgemessen und im 3D Modell eines BIM modelliert werden sollten. Nur so kann doch von "einer verlässliche Quelle für Entscheidungen" wie es NBIMS will, gesprochen werden. Z.B. muss bekannt sein, wie stark ein Bauteil von der geplanten Lage und Form abweicht, um entscheiden zu können, ob nachgebessert, erneuert oder gar nicht eingegriffen werden muss.

## **Allgemeine Hindernisse**

Es ist deshalb verwunderlich, dass es eigentlich keine Werkzeuge für eine echte, verformungstreue Visualisierung gibt. Was es gibt, ist die Erfassung von Planabweichungen nach DIN 18202. Schäfer und Schmitt-Böllert (2011) zeigen den Einsatz eines Laserscanners zur Erfassung der Bauwerksgeometrie anhand einer automatischen Ebenheitskontrolle eines Rohfußbodens (nach DIN 18202 vgl. Abb.1.1).

Auch Heunecke (2014) beschreibt, wie verschiedene Toleranzen nach DIN 18202 mit Laserscannern und Tachymetern überprüft werden können. Nach Heunecke (2014) tritt ein Laserscanner, was die erreichbare Messgenauigkeit betrifft, bei der Ebenheitskontrolle jedoch an seine Grenzen. Dem widersprechen Bosché und Biotteau (2015), indem sie sagen, dass der Laserscanner durch seine Punktdichte, also durch die Redundanz, die erforderliche Genauigkeit erreicht.

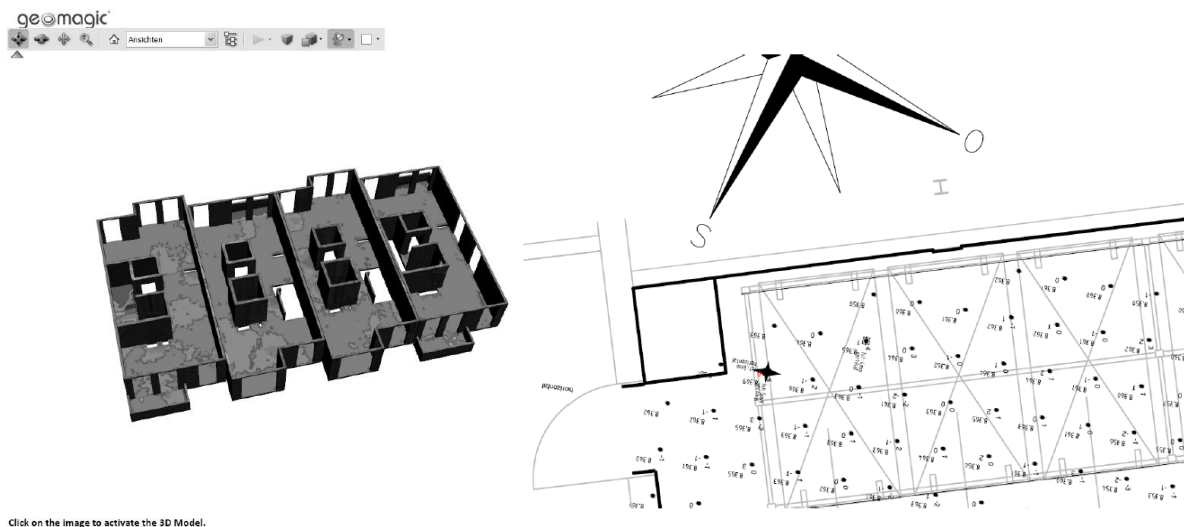


Abb. 1.1: Links: Ist- Soll- Vergleich als 3D-pdf. Rechts: Ebenheitskontrolle nach DIN 18202. [Schäfer & Schmitt-Böllert, 2011]

Schon 2009 zeigten Kutterer et al., dass sich die hohe Messfrequenz eines Laserscanners zur Analyse im Frequenzbereich eignet. Bosché und Biotteau (2015) setzen dies um, indem sie aus Laserscan-Punktwolken durch Methoden der Signalverarbeitung Oberflächen generieren (vgl. Kap.3). Auf diese Weise versuchen sie detailgetreuere Ergebnisse zu erzielen und die gesamte Informationsdichte einer Punktwolke auszunutzen. Zugleich wollen sie die Grundlage einer neuen Standardmethode zur Ebenheitskontrolle schaffen. Bereits ein Jahr zuvor befasste sich Bosché zusammen mit Guenet (2014) mit der automatischen Ebenheitskontrolle von Rohfußböden. In dieser Arbeit verbinden sie die Punktwolke mit jeder Rohdecke unter Anwendung der Straightedge Methode und vergleichen die Ergebnisse mit vorgegebenen Toleranzen. Die Straightedge-Methode ist im Grunde jene Vorgangsweise, die die Norm DIN 18202 empfiehlt. In ihrem Paper von 2015 gehen Bosché und Biotteau kritisch auf die Nachteile dieser Methode ein.

Daneben befassen sich Wang et al. (2015) mit der Erfassung und Qualitätskontrolle unregelmäßiger Betonfertigteile mithilfe von Laserscans.

Ohlmann-Lauber (2012) befasst sich mit der Deformationsmessung in Tunnels. Dabei geht er speziell auf sogenannte Pseudodeformationen ein, die z.B. durch Auf- oder Abtragen von Material entstehen. Solche Pseudodeformationen sind vor allem dann kritisch, wenn kleine Deformationen nahe der Registrierungsunsicherheit aufgedeckt werden sollen. Zur Bestimmung zuverlässiger und hochgenauer Deformationen sind solche Pseudodeformationen herauszufiltern. In seinem Paper geht Ohlmann näher auf diese Filteransätze ein (vgl. dazu Kap.3).

Eine Echtzeitkontrolle von Infrastrukturbaustellen mithilfe von GNSS-Rovern und Tachymetern, welche die Messdaten via Internet an eine Cloud schicken, zeigen Kivimèki und Heikkil (2015). Die an die Cloud geschickten Messdaten werden automatisch mit dem geometrischen 3D Modell des BIMs verglichen, um Planabweichungen zu erkennen.

Die 2007 gegründete Firma Flexijet GmbH wirbt mit über 800 Aufmaßsystemen rund um den Globus (Flexijet, 2014). Mit dem Produkt "Flexijet 4Revit" bietet die Flexijet GmbH namentlich ein "verformungsgerechtes Aufmaß" als Basis für Sanierungen an (Flexijet, 2015b). Dafür verwendet Flexijet ein selbst als revolutionär bezeichnetes BIM-Aufmaßsystem, welches auf einem Stativ, einer Dreh- Schwenkeinheit, dem Laserdistanzmesser Disto von Leica und einem Notebook mit zugehöriger Software, basiert (Flexijet, 2015a). Ein Gespräch mit dem Kundendienst verdeutlichte, dass mit "Flexijet 4Revit" nur das verformungsgetreu aufgenommen werden kann, was revit auch darstellen kann.

Also sind z.B. durchhängende Decken (vgl. Softwarebedingte Hindernisse) nicht darstellbar. Visualisierbar sind hingegen Wände, die einander nicht mit 90° treffen und Ähnliches. Desweiteren erklärte der Kundendienst, dass jedoch mit herkömmlichen AutoCAD anstelle von revit als Auswertesoftware alles aufmessbar ist, was dargestellt werden kann (Bögen, Splines, etc.). Jedoch, da es sich nicht um einen Scan handelt, müssen alle fraglichen Punkte manuell abgetastet werden. D.h. also, handelt es sich z.B. um wellige Geometrieverformungen, eventuell aufgrund einer beschädigten Großflächenschalung, so muss jeder Wellenberg und jedes Wellental vor Ort zum einen erkannt und zum anderen manuell erfasst werden. Folglich können auch mit dieser Methode lediglich nicht senkrechte Wände und oder nicht rechtwinklig zulaufende Wände rentabel und zuverlässig gemessen werden.

Laut DIN 18202 darf dies jedoch tatsächlich als verformungstreu aufgefasst werden. Denn laut Norm sind unter Einhaltung der Messbedingungen, die ebenfalls in der DIN 18202 beschrieben sind, nur die drei folgenden Toleranzen zu prüfen (DIN, 2005): Grenzabmaße, Winkeltoleranzen und Ebenheitstoleranzen.

Das Grenzabmaß ist die Differenz zwischen Nenn (Soll)- und Höchst- bzw. Mindestmaß (das höchste- bzw. kleinste zulässige Maß). Die Winkeltoleranz ist der zulässige Unterschied zwischen Nenn- und Istwinkel. Die Ebenheitstoleranz beschreibt die Abweichung einer Fläche von geraden Messlinien.

Bereits Schäfer und Schmitt-Böllert (2011) merken jedoch an, dass vor allem bei der Ebenheitskontrolle darauf zu achten ist, dass die DIN 18202 von einer punktuellen Betrachtung der Ebenheit über die Ermittlung von Stichmaßen ausgeht. Jedoch können mit großflächiger Datenerfassung, wie es bei einem Laserscanner der Fall ist, detailreiche Abbilder der Oberfläche erzeugt werden, welche durchaus profundere Aussagen zur Ebenheit in Abweichung zu DIN 18202 zulassen. Im Tunnelbau ist die Ebenheitskontrolle von Spritzbetonoberflächen mittels Laserscanning bereits Standard (Chmelina et al., 2012).

Zudem bezieht sich die Ebenheitsabweichung immer auf eine Betrachtung der Fläche innerhalb ihrer Ränder, unabhängig von deren Lage im Bezugssystem der Baumaßnahme (Heunecke, 2014). Folglich könnte eine Unebenheit am Rande der Fläche unbemerkt bleiben und tückischerweise die nicht beachtete Raumlage zu einer Toleranzüberschreitung späterer Bauausführungen führen; so könnte es z.B. geschehen, wenn zwei Geschossdecken in ihrer räumlichen Lage zueinander abweichen, dass später zwischen ihnen einzusetzende Fassadenelemente nicht senkrecht eingebaut werden können!

Dazu kommt noch, dass laut DIN 18202 nur dort Maße kontrolliert werden müssen, wo es erforderlich scheint, z.B. wenn die Funktion der im Zusammenhang stehenden Bauteile beeinträchtigt scheint (DIN, 2005). Dies widerspricht aber dem Anspruch von BIM, ein umfassendes Datenreservoir zu sein, da auf diese Weise das Gebäude nur teilweise erfasst würde und somit große Datenlücken bei der Bestandsaufnahme entstünden. Laut BIM-Leitfaden für Deutschland sollte jedoch eine Bestandsaufnahme immer erfolgen, da die Daten für den weiteren Lebenszyklus gebraucht werden (Egger et al., 2013).

Außerdem betrachtet DIN 18202 nur zeit- und lastabhängige Verformungen, jedoch bleibt der Temperatureinfluss unbeachtet (Heunecke, 2014).

DIN 18202 besagt weiter, dass jeder Bereich ausdrücklich für sich zu prüfen ist (Heunecke, 2014). Dies führt jedoch dazu, dass großflächige Deformationen, z.B. aufgrund von Setzungen, die sich über mehrere Bereiche erstrecken, unter Umständen unerkannt bleiben.

Die letzten hier aufgeführten Punkte zeigen das große Potential des verformungsgerechten Aufmaßes für ein BIM besonders. Durch das vollständige Erfassen des Gebäudes bildet das Aufmaß die Grundlage für ein vollständiges Gebäudemonitoring (vgl. dazu Kap.5), inklusive Setzungsmessung und thermischem Verhalten des Gebäudes.

### **BIM-Software bedingte Hindernisse am Beispiel revit**

Neben der Problematik, dass die Norm nicht BIM-gemäß definiert ist, gibt es noch eine ganze Reihe Software bedingter Gründe und Probleme, warum eine verformungstreue Visualisierung zurzeit nicht wirklich möglich ist. Das besonders fortgeschrittene BIM-fähige Programm revit von Autodesk soll im Folgenden exemplarisch für die Betrachtung herangezogen werden. Auf dem Markt gibt es selbstredend noch einige weitere vergleichbare Produkte wie z.B. Archicad von Graphisoft oder Allplan von Nemetschek.

Vordringlich stellt sich die Frage, wie genau die Punktwolke in revit referenziert werden kann. Revit bietet keinerlei Möglichkeiten einer Skalierung, geschweige denn einer Transformation. Die Vorgehensweise, eine Punktwolke zu referenzieren, ist in groben Zügen folgende (Bauer, 2015): In revit wird ein Punkt, der auch in der Punktwolke bekannt ist, mit Koordinaten versehen. Nun wird die Punktwolke über diesen einen Punkt so verschoben, dass der Punkt in der Wolke mit dem koordinierten Punkt übereinstimmt. Zum Schluss wird die Punktwolke noch nach geographisch Nord ausgerichtet. Dieses Vorgehen wird in revit als Transformation bezeichnet (revit, 2015). Aber im Grunde ist es nur ein Schieben und Drehen der Punktwolke mithilfe eines einzigen Punktes, ohne irgendwelche Verzerrungen, andere Bezugskoordinatensysteme, unterschiedliche Nordrichtungsdefinitionen etc. zu berücksichtigen. Das führt jetzt zur Frage, wie die Punktwolke über das 3D-Modell gelegt wird. Denn je nachdem, wie die Punktwolke eines aufgemessenen Gebäudes gegenüber dem, mittels BIM zuvor geplanten, Modell ausgerichtet wird, werden mögliche Verformungen größer oder kleiner. Auch Ohlmann-Lauber (2012) spricht an, dass die Genauigkeit abzuleitender Deformationen sowohl vom Fehlerhaushalt des Laserscan-Systems

abhängig ist, als auch von der Registrierungsunsicherheit bei der Bestimmung des Referenzrahmens und dessen Koordinaten. Somit kann die fehlerhafte Positionierung einer Punktwolke aufgrund einer schlechten Registrierung Scheindeformationen zur Folge haben.

Dächer können im Gegensatz zu Decken in revit als Freiformflächen erzeugt werden. Hängt nun ein Decke in einem Bestandsgebäude durch, so müsste derzeit für die verformungstreue Modellierung dieser Decke ein Dach definiert werden. Dies widerspricht jedoch wieder der BIM Logik, da in so einem Fall die durchgebogene Decke nicht als Decke sondern als Dach geführt würde, was die Kostenrechnung, Stücklisten etc. verfälschen würde.

In revit lassen sich Wände aus Freiformflächen modellieren. Somit ist es theoretisch möglich, verformte Wände zu gestalten. Jedoch muss eine Freiformfläche manuell über die Punktwolke gefittet werden, wodurch Freiformwände kompliziert und aufwändig zu gestalten sind.

Es wird also noch kein geeignetes Tool geboten, um ein Gebäude oder beliebige Teile dessen verformungsgerecht zu visualisieren. Das einzige Werkzeug, welches in diese Richtung geht, ist das Einfärben der Punktwolke relativ zum Abstand zum Modell. D.h., je weiter ein Punkt vom Modell entfernt ist, desto markanter wird er koloriert. Das kann dann noch mit Abstandsangaben versehen werden. Aber auch dies ist keine tatsächliche Visualisierung der Verformung.

Desweiteren muss noch angeführt werden, dass die BIM-Software revit dem BIM-Standard IFC (Industry Foundation Classes) nicht immer entspricht (Bauer, 2015).

## **Rechtliche Hindernisse**

Als Letztes soll kurz ein bisher unbeachtetes rechtliches Hindernis angesprochen werden. Das Aufmaß eines Gebäudes in einem so hohen Detaillierungsgrad hat den Nachteil, dass mit Sicherheit Baumängel entdeckt werden, die sonst unangefochten blieben. Der Bauherr hat das Recht auf eine mängelfreie Bauausführung oder gegebenenfalls auf eine Entschädigung. Laut BGB ist ein Gebäude frei von Sachmängeln, wenn es die vereinbarte Beschaffenheit hat (BGB, 2015), die üblicherweise in einer Leistungsbeschreibung und in den Plänen enthalten ist. Folglich muss, dem Stand der Technik entsprechend, die vertragliche Vereinbarung, in welchem Umfang definierte Verformungen vorkommen dür-

fen, angepasst werden (ähnlich wie die DIN 18202 angepasst werden sollte). So z.B. sollte festgelegt sein, wie viel eine Decke gewichts- und baubedingt nicht der Plangeometrie entsprechen darf und das genauer als es die Norm bisher tut.

## **2 Lösungsvorschlag durch Overlay von modellierten Freiformflächen über der Standardgeometrie in revit**

Nicht überall im Gebäude kommen signifikante Deformationen vor. Deshalb muss nicht das komplette Gebäude verformungsgerecht modelliert werden. Dies würde wie oben beschrieben sogar mit DIN 18202 übereinstimmen (DIN, 2005). Ein vollständig verformungstreu modelliertes Gebäude würde, abhängig von der Gebäudegröße, zu einem namhaften Mehraufwand an Rechenleistung und Speicherplatz führen. Deformationen werden also nur dort visualisiert, wo auch tatsächlich signifikante vorkommen. Schäfer und Schmitt-Böllert (2011) haben in ihren Ausführungen gut gezeigt, wie man z.B. anhand der Norm zur Ebenheitskontrolle automatisch berechnen könnte, wo erhebliche Deformationen der Rohdecken vorkommen, um diese dann dort zu visualisieren.

In jenem Bereich, der nun über eine solche automatische Voranalyse detektiert wird, könnte aus der verwendeten BIM Software, z.B. revit, das geplante 3D-Modell ausgewählt und mit seiner vollständigen geometrischen Information in einem anderen Programm geladen werden. Dort wird dann das betroffene Bauteil mit der Punktwolke des Aufmaßes in einem gemeinsamen Koordinatensystem referenziert. Zu lösen ist natürlich noch die Rückführung ins BIM.

Als Nächstes müssen aus der Punktwolke des Aufmaßes die tatsächlichen Flächen abgeleitet werden. Da die Deformation möglichst exakt visualisiert werden soll, reicht keine Regelgeometrie aus. Z.B. könnten die deformierten Flächen aus durch Splines erzeugte Freiformflächen generiert werden. Die Splines werden hierbei so gewählt, dass sie einen möglichst geringen Abstand zu den Messpunkten aufweisen, was sich wiederum mittels Ausgleichsrechnung optimieren lässt. Grimm-Pitzinger & Rudig (2005) zeigen die Ableitung der Fläche einer Staumauer durch die Erzeugung einer Freiformfläche aus NURBS (non uniform rational B- Splines).



### **3 Beschreibung der theoretischen Möglichkeiten und eines selbstgewählten Ansatzes**

#### **Theoretische Möglichkeiten**

Durch Splines kann also eine Freiformfläche erzeugt werden, welche eine Verformung visualisiert. Signifikante Deformationen sind als Baumängel prüfbar (z.B. eine Toleranzüberschreitung) und führen zu (Heunecke, 2014):

- Mehrkosten infolge von Zusatzmaßnahmen (Anpassen und Nacharbeiten)
- Qualitätsminderung, gegebenenfalls sogar Schäden
- Behinderung des Bauablaufs (ungeplante Stillstandzeiten)
- Beeinträchtigung des wunschgerechten Aussehens eines Bauwerks.

Die ersten beiden Punkte sind im Folgenden hinsichtlich ihrer Tragweite etwas näher erläutert. Der dritte Punkt wird hier nicht behandelt. Der letzte Punkt ist durch ein verformungstreuere Aufmaß direkt abgedeckt.

Treten Mehrkosten auf, so entsteht die Streitfrage, wer sie zu tragen hat. Im Kap.2 wurde erläutert, dass ein betroffenes Bauteil mit allen zugehörigen Informationen aus dem 3D- Modell entnommen wird. Zu diesen Informationen zählen auch die statischen Berechnungen. Aus diesen Berechnungen lassen sich die zu erwartenden Deformationen ableiten. Z.B. biegt sich ein Träger, der an seinen Enden jeweils auf einem Lager aufliegt, bei einer senkrecht von oben wirkenden Belastung in einem vorher berechenbaren Maß immer nach unten durch.

Wird nun bei der Visualisierung der Deformation festgestellt, dass sich der eben beschriebene beispielhafte Träger nach oben durchgebogen hat, so ist unter Ausschluss von Messfehlern klar, dass ein Produktionsfehler vorliegen muss, oder dass der Träger beim Transport oder Einbau beschädigt wurde (der Träger wurde z.B. durch unsachgemäße Lagerung verbogen). Somit ist der Kostenträger bei einer dieser ausführenden Firmen zu suchen. Genauso lassen sich auch baubedingte Deformationen detektieren. Z.B. soll eine Wand betoniert werden. Wurde die Schalung zu schwach ausgeführt, so ist die Wand im unteren Drittel bauchig und nach oben wird sie schmaler. Wird also eine solche Deformation aufgedeckt, so ist klar, dass der Schaler nicht ordentlich gearbeitet hat.

Nicht nur der Kostenträger lässt sich mit einer exakt visualisierten Deformation leichter erkennen, sondern auch der nötige Maßnahmenkatalog, um den entstandenen Qualitätsverlust zu kompensieren. Z.B. wird der Verdacht geäußert, dass eine Sichtbetondecke zu tief betoniert wurde. Bisher war es so, dass die bauausführende Firma erst dann zum Vermesser kam und der ging dann auf die Baustelle, um die fragliche Decke nachzumessen. Oft stand so kurzfristig kein Scanner zur Verfügung, weshalb tachymetrisch gemessen wurde. Dafür musste der Lotstab kopfüber an die Decke gehalten und auf diese Weise ein bestimmtes Raster abgetastet werden um zu überprüfen ob die Decke tatsächlich zu tief betoniert wurde. Ein solches Vorgehen birgt jedoch einige Risiken, welche im Folgenden angesprochen werden.

Eine Decke könnte nun aufgrund leicht falsch gestellter Schalungstische zu tief betoniert worden sein. Es könnten aber auch die Hilfsstützen zu früh entfernt, oder die Decke könnte zu früh belastet worden sein, wodurch sie gewichtsbedingt in der Mitte durchhängt. In solchen Fällen reicht das tachymetrische Raster aus.

Es kann aber auch sein, dass die fragliche Decke z.B. mit alten Schalungstischen betoniert wurde, die aufgrund der mehrmaligen Nutzung verformt sind. So könnte nun jeder Tisch um ein bis zwei Zentimeter durchhängen. Wurde die Decke nun ausgeschalt, so hat ihre Oberfläche einen welligen bzw. zerbeulten Charakter. Für diesen Fall reicht ein tachymetrisches Raster i.d.R. nicht mehr aus und bietet somit keine ausreichende Informationsgrundlage mehr, um zu entscheiden, wie die Mängel behoben werden können. Erst durch die exakte Erfassung der Deformation mit Laserscanning lässt sich der Handlungsbedarf genau abschätzen, ob z.B. die Unebenheiten geschliffen oder überputzt werden müssen. Gleichzeitig kann dann im 3D- Modell geprüft werden, ob ein Überputzen der Unebenheiten das Lichte Maß des Raumes beeinträchtigt, oder ob ein Abschleifen sogar die Statik beeinflusst.

Die Synergie zwischen verformungsgerechtem Aufmaß und BIM ist vielversprechend. Wie in diesem Kapitel gezeigt, können die statischen Berechnungen zum einen verwendet werden, um daraus zu erwartende Deformationen abzuleiten, um damit wiederum den Deformationsverursacher als Kostenträger für die Baumängelbeseitigung zu ermitteln. Zum anderen können statische Berechnungen durch Deformationen oder Baumängelbeseitigung entwertet werden, wodurch das verformungstreue Aufmaß zur Grundlage neuer statischer Berechnungen wird (vgl. dazu Kap.5).

## Mögliche Vorgehensweise

Ytterberg (1996) zeigt, dass die Ebenheit eines Fußbodens vor allem bei Lagerhäusern kritisch ist, da Gabelstapler empfindlich auf Unebenheiten reagieren. Dabei wirken sich Unebenheiten mit einer Frequenz von 50-200% des Achsabstandes des Gabelstaplers besonders stark aus. Um eine ausreichend genaue Ebenheitskontrolle befriedigend durchzuführen, benötigt es genaue Methoden. Dies veranschaulichen, wie In Kap.1 bereits kurz erwähnt, Bosché und Biotteau (2015). Sie verwenden dafür eine angepasste Continuous Wavelet Transformation. Bei der Continuous Wavelet Transformation handelt es sich um eine Erweiterung der herkömmlichen Wavelet Transformation und sie ist am besten zur Mustererkennung in einem Signal geeignet. Der Vorteil einer Wavelet Transformation ist, wie es Bosché und Biotteau (2015) zeigen, dass nicht nur signifikante Undulationen detektiert werden können, sondern dass die Undulationen auch Lageinformationen haben. Im Gegensatz dazu können z.B. mit einer Fourier Transformation Unebenheiten auch erkannt werden, haben aber keinen Lagebezug, weshalb sie für die vorliegende Aufgabenstellung ungeeignet sind.

Im Groben ist die Vorgehensweise von Bosché und Biotteau wie folgt:

Vorbereitend muss die Punktwolke weitestgehend von Messrauschen bereinigt werden, indem die Messwerte z.B. mit einem Mittelwertfilter geglättet werden. Ohlmann-Lauber (2012) spricht davon, dass das Rauschen erfahrungsgemäß um einen Faktor zwei bis drei reduziert werden kann. Er verwendet dafür z.B. einen Binomialfilter. Für eine statistische Analyse aus Differenzbildung gewonnener Deformationen ist laut Ohlmann-Lauber eine vorangehende Datenfilterung der Kernbestandteil.

Anschließend wird über die betrachtete Fläche ein Gitternetz mit bestimmtem Linienabstand gelegt (z.B. 30cm). Nun werden aus den Messpunkten auf diesem Gitter die Eingangssignale erzeugt, welche anschließend auf Undulationen untersucht werden.

Als Nächstes ist, wie bei herkömmlichen Wavelet Transformations, der Faltungsoperator zu wählen (z.B. ein Mexican Hat). Die Eingangssignale  $f_c$  werden jetzt mit diesem Operator mit einer bestimmten Bandbreiten  $a$  gefaltet. Auf diese Weise können Undulationen charakteristischer Frequenzen  $f$  des Fußbodens mit Lagebezug detektiert werden.  $f$  kann berechnet werden mit (Addison, 2002):

$$f = f_c / \delta_p a \quad (1)$$

wobei  $\delta_p$  die Punkt-Abtastperiode des Eingangssignals ist.

Addison (2002) beschreibt in seinem Handbuch die Wavelet Transformation ausführlich. Die nun erkannten Undulationen können z.B. in einem Höhenprofil visualisiert werden.

Die Methoden der Signalverarbeitung bieten sich auch im Falle der Detektion allgemeiner Deformationen in einem Gebäudeaufmaß an. Die enorme Datenmenge einer Laserscan-Punktwolke kann mit herkömmlichen Mitteln bei der Deformationsanalyse nicht befriedigend genutzt werden. Bosché und Biotteau (2015) vergleichen ihre Ergebnisse mit den Ergebnissen herkömmlicher Wavelet Transformations. Ein Vorteil soll hier genannt werden. Mit der Continuous Wavelet Transformation wurde es im Gegensatz zur herkömmlichen Wavelet Transformation möglich, Resultate für 100 Eingangsfrequenzen zu erzielen im Gegensatz zu den bisherigen fünf. Methoden der Frequenzanalyse bieten folglich ein großes Potential zur besseren Ausnutzung der Scandaten. Im Gegensatz zur 2,5D Visualisierung der Unebenheiten durch Bosché und Biotteau ist im Falle der Visualisierung von Gebäudedehformationen für ein BIM eine echte 3D-Visualisierung unbedingt erforderlich.

Auch das Wegfiltern der Störobjekte im Tunnelbau wie bei Ohlmann-Lauber (2012) beschrieben, ist für die vorliegende Problemstellung der Deformationsmessung vor allem am Bau wichtig (weniger im Bestand, weil sich dort i.d.R. nicht mehr kurzfristig Oberflächen ändern). Auch am Bau werden zu messende Objekte immer wieder von Objekten abgedeckt oder verfälscht. Z.B. führt eine angebrachte Meterriss-Plakette für den Ausbau, welche ca.  $15 \times 15 \times 0,4 \text{ cm}^3$  groß ist, an dieser Stelle zu Pseudodeformationen; ebenso die bereits angebrachten Leisten für den Verputzer, das Geländer am Aufzugsschacht oder auch nur die Palette Ziegel, die mitgescannt wird. Diese Objekte sind nun herauszufiltern. In Ohlmann-Bartusel (2008 und 2009) ist ausführlich ein adaptiver Filteralgorithmus zur Elimination von Pseudodeformationen auf Grund von Oberflächenänderung beschrieben.

## 4 Illustration an einem praktischen Beispiel mit deformierten Wänden

Als Testdatensatz dient für diese Arbeit ein Laserscan der Kirche St. Ägidius in Gelchsheim. Der Datensatz wurde von der Ingenieurgesellschaft Gemmer und Leber zur Verfügung gestellt. 1492 wurde das Fundament des Kirchturms gegründet (würzburgwiki, 2015), welcher hier beispielhaft verwendet wird. Nach dem Modellieren der Umrissse wurden einige Abweichungen der Punktwolke zum Modell festgestellt. Dies beruht natürlich auf der historischen Bauweise. In revit ist die Abbildung dieser baubedingten Deformationen nicht möglich. In Abb.4.1 ist gezeigt, wie eine Wand anhand der Punktwolke gezeichnet wird. Um den Konturen der gekrümmten Wände in etwa folgen zu können, werden relativ kurze Wandelemente aneinandergereiht.

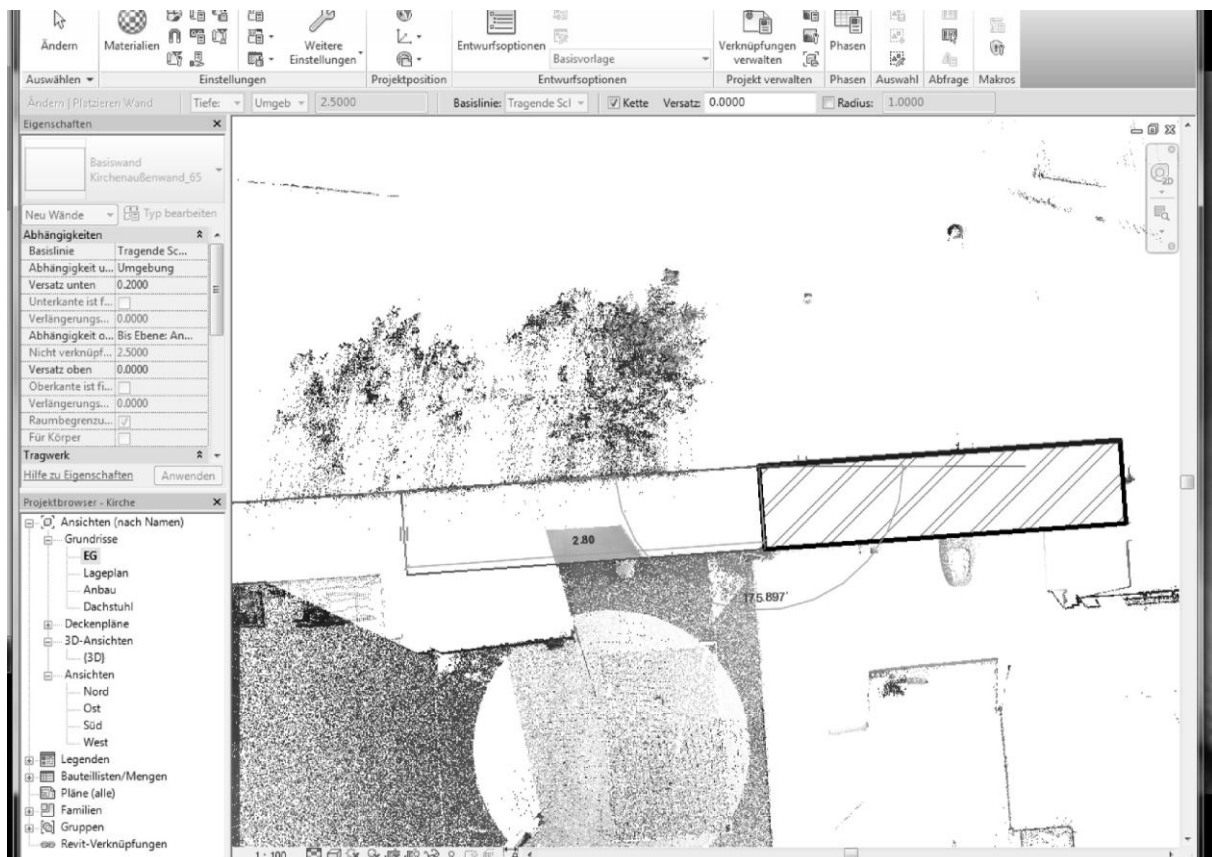
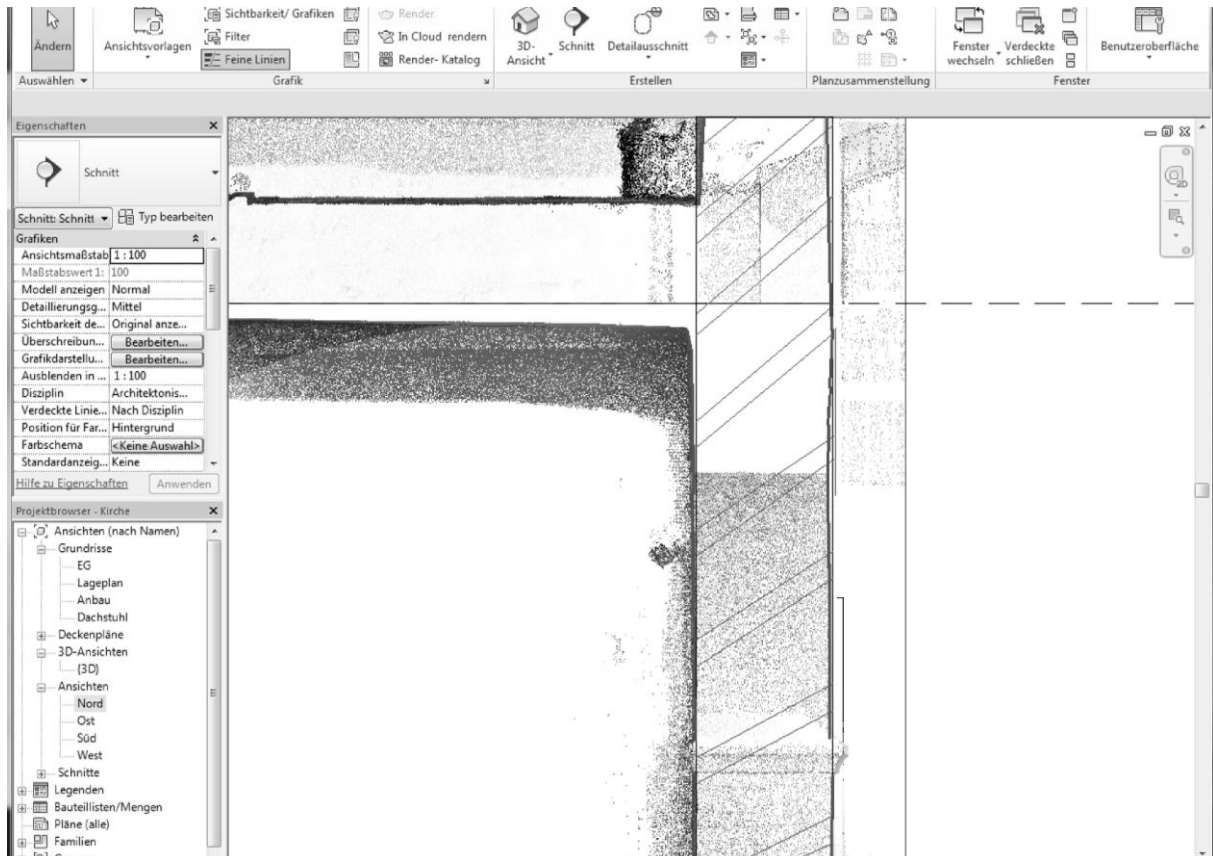


Abb.4.1: Konstruktion einer Wand in revit anhand der Punktwolke. Um der nicht geradlinig verlaufenden Wand zu folgen, werden kurze Teilstücke gesetzt.

Die Schwächen dieses Vorgehens liegen auf der Hand: es gelingt nur, wenn die Innenseite der Wand immer parallel zu Außenseite ist, die Wandstärke nicht variiert und die Krümmungen senkrecht von der Unterkante bis zur Oberkante der Wand verlaufen, also gleichmäßig sind (mit den in Kap.1 erwähnten Freiformwänden kommt die modellierte Wand der tatsächlichen etwas näher). Auch bei Freiformwänden muss die Innenseite parallel zur Außenseite sein und die Wandoberfläche zur Verformungsdarstellung manuell über die Punktwolke gefittet werden. Keiner der genannten Punkte wird bei einem historischen Gebäude eintreten. Und auch bei einer echten, durch Lasten bewirkten, Deformation werden sich die Gegebenheiten wohl kaum so idealisieren lassen. Eine Deformation ist eine unbekannte Abweichung von der Plangeometrie und kann deshalb niemals durch solche einfachen Mittel realitätsnah visualisiert werden. Aus diesem Grund ähneln die historischen, baubedingten den bei modernen Bauwerken begegneten Deformationen.

In Abb.4.2 ist der Querschnitt einer Wand im Turminnenen gezeigt. Deutlich ist zu erkennen, dass die tatsächliche Form der Wand nichts mit der in revit erzeugten Geometrie gemein hat. Genauso wenig hat eine durch schlechte Schalung verformte Wand etwas mit der Sollgeometrie zu tun und kann deshalb mit revit auch nicht befriedigend visualisiert werden. Übrigens läßt sich die in Abb.4.2 gezeigte Decke in revit, wie in Kap.1 erläutert, nicht modellieren, da sie leicht gewölbt ist.

Mit einer Methode der Signalverarbeitung könnten nun sowohl die Oberflächen unregelmäßiger Wände als auch gekrümmte und zerbeulte Decken und Böden generiert und somit auch visualisiert werden. Durch ein klug gelegtes Raster zur Berechnung der Eingangssignale kann zum einen der Rechenaufwand und zum anderen die Detailliertheit der Oberfläche gesteuert werden. Mit einem entsprechend engen Raster könnten somit auch Oberflächen von Sichtmauerwerken realistisch und zum größten Teil automatisch erzeugt werden.



*Abb.4.2: Schnitt durch eine Wand des Kirchturmes von 1492. Gut zu erkennen ist das Schwanken des tatsächlichen Mauerverlaufs als kräftigere schwarze Linien um die in revit modellierte Mauer (Schraffur mit dünnen Begrenzungslinien). Das übliche Vorgehen in revit wäre in diesem Fall jedoch stockwerkweise und nicht wie hier, beispielhaft gezeigt, über zwei Stockwerke hinweg.*

## 5 Ausblick

Ein verformungsgerechtes Aufmaß erfasst den Istzustand des Bauwerks und kann somit zur Grundlage für ein Langzeit-Monitoring werden. Selbst ein Aufmaß am Rohbau kann zum Teil für ein solches Monitoring herangezogen werden, v.a. in den Untergeschossen; z.B. bleiben in der Tiefgarage die Wände unverputzt, die Decken unverkleidet (jedoch hängen viele Rohre an der Decke) und der Boden ohne Aufbau.

Nach natürlichen und menschenbedingten Einwirkungen kommt es bei Gebäuden oft zu Deformationen, weshalb es nötig werden kann, die Statik der Gebäude neu zu berechnen. Ein verformungsgerechtes Aufmaß kann die Grundlage dieser statischen Berechnungen bilden. Auch wenn z.B. beim Gebäudemonitoring Setzungen festgestellt werden, die die Statik des Gebäudes beeinträchtigen, kann dieses Aufmaß als Berechnungsgrundlage dienen. Zudem kann erkannt werden, wo z.B. ein Gebäude sich am meisten setzt und wo es somit mit baulichen Maßnahmen gesichert werden muss. Dies kann jedoch auch bereits mit herkömmlichen Aufmaßen geschehen. Jedoch können mit einem verformungsgerechten Aufmaß und dessen Visualisierung im 3D-Modell eines BIMs solche Berechnungen und Analysen synergetisch mit dem Aufmaß kombiniert werden.

Desweiteren kann das Verhalten der Bauteile selbst beobachtet werden. Wird etwa ein Fertigteil verbaut, so kann es direkt aufgemessen und anschließend mit dem Aufmaß unter Belastung verglichen werden (z.B. wie stark wird eine belastete Stütze gestaucht, wie verformt sich ein auskragendes Bauteil, etc.). Dies kann evtl. wieder über einen längeren Zeitraum geschehen, wodurch das Materialverhalten beobachtet werden kann. Dies wiederum führt dazu, dass ein verformungsgerechtes Aufmaß zur Grundlage eines Belastungsmodells werden kann. Das Potential ist sehr ansehnlich!

## **Literatur**

- Addison PS (2002) The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance, 1st edition, CRC Press.
- Bauer S (2015) Verwendung von BIM in der Ingenieurgeodäsie. Technische Universität München, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt, Lehrstuhl für Geodäsie, Master's Thesis, S.43-46 + 6.
- BGB (2015) Bürgerliches Gesetzbuch §633 Sach- und Rechtsmängel.
- Borrmann A (2013). Building Information Modeling - Durchgängige Planung, Realisierung und Bewirtschaftung auf Basis eines digitalen Gebäudemodells. Technische Universität München, Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation.
- Bosché F und Biotteau B (2015) Laser Scanning and the Continuous Wavelet Transform for Flatness Control. In: International Association for Automation



- and Robotics in Construction (IAARC), 2015 Proceedings of the 32st ISARC, OULU, Finland, S.1-7.
- Bosché F und Guenet E (2014) Controlling Slab Flatness Automatically using Laser Scanning and BIM. In: International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 2014 Proceedings of the 32st ISARC, Sydney, Australia, S.813-820.
- Chmelina K, Jansa J, Hesina G, Traxler C (2012) TLS zur Bestimmung von absoluten 3d-Verschiebungen an Spritzbetonoberflächen – Beispiel eines Mess- und Auswertesystems für den Tunnelbau. In: Tagungsband DVW- Seminar, TLS2012.
- DIN(2005): DIN 18202: 2005-10.
- Egger M, Hausknecht K, Lieblich T, Przybylo J (2013) BIM - Leitfaden für Deutschland, Information und Ratgeber, Endbericht. Im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumentwicklung (BBR), S.18 + S.40.
- Flexijet (2014) Flexijet- Innovation CAD- Aufmaß. Vorstellung der Flexijet GmbH. <http://www.flexijet.info/firma/flexijet-gmbh/> [Stand:Q1-2014, zugegriffen am 21.09.15].
- Flexijet (2015a) Flexijet 4 ARCHITECTS. <http://www.flexijet.info/produkte/flexijet-4architects/das-flexijet-4architects/> [zugegriffen am 21.09.15].
- Flexijet (2015b) Flexijet 4REVIT. <http://www.flexijet.info/produkte/flexijet-4revit/das-flexijet-4revit/> [zugegriffen am 21.09.15].
- Grimm- Pitzinger A und Rudig S (2005) Freiformflächen für Defomrationsmessungen. In: zfv 3/2005 Fachbeitrag, S.180-183.
- Heunecke O (2014) Eignung geodätischer Messverfahren zur Maßkontrolle im Hochbau. In: zfv 4/2014 Fachbeitrag, S.241-251.
- Kivimèki T und Heikkil R (2015) Infra BIM Based Real- time Quality Control of Infrastructure Construction Projects. In: International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 2015 Proceedings of the 32st ISARC, Oulu, Finland, S.1-6.
- Kutterer, H., Paffenholz, J.-A., Vennegeerts, H. (2009): Kinematisches terrestri-sches Laserscanning. Zeitschrift für Vermessungswesen (zfv), 134(2), S. 79-87.
- NBIMS (2012) National Institute of Building Science. United States National Building Information Modeling Standard, Version 2.0. <http://www.nationalbimstandard.org/faq.php#faq1>
- NIBS, N. (2007). United States national building information modeling standard: Version 1 - part 1: Overview, principles, and methodologies. NIBS und buildingSMART alliance.

- Ohlmann-Bartusel, J. (2008): Innovative determination of areal deformations of an excavated tunnel intrados by multi-temporal laser scanning data. Diplomarbeit, Technische Universität München.
- Ohlmann-Bartusel, J., Höfle, R., Fillibeck, J. (2009): Ortsbrustdeformationen - Ortsbruststandsicherheit, Teil 1: Bestimmung und Mehrwert von flächenhaften Ortsbrustdeformationen. In: Wunderlich, Th. (Hrsg.): Blaue Reihe des Lehrstuhls für Geodäsie, Heft 13.
- Ohlmann-Lauber J (2012) Filterungsansätze zur Bestimmung flächenhafter Deformationen aus TLS- Daten. In: Tagungsband DVW- Seminar, TLS2012.
- revit (2015) Autodesk ® Revit ® 2016|Hilfe, Geometry Helper Klassen, Transform.<http://help.autodesk.com/view/RVT/2016/DEU/?guid=GUID-78445211-E211-4E27-B080-BE9FA3C50631> [zugegriffen am 21.09.15].
- Schäfer M und Schmitt- Böllert A (2011) 3D-Laserscanning zur Erfassung der Bauwerksgeometrie für die Rohbaukontrolle. In: Tagungsband DVW- Seminar, TLS2011.
- Schäfer, Th., Weber, Th., Kyrinovic, P., Zámecniková, M. (2004): Deformation Measurement using Terrestrial Laser Scanning at the Hydropower Station of Gabčíkovo. In: Proc. of INGENEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, Slovakia.
- Wang Q, Cheng J, Sohn H (2015) Automated Quality Inspection of Precast Concrete Elements with Irregular Shapes Using Terrestrial Laser Scanner and BIM Technology. In: International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 2015 Proceedings of the 32st ISARC, Oulu, Finland, S.1-8.
- würzburgwiki (2015) St. Ägidius (Gelchsheim). [http://wuerzburgwiki.de/wiki/St.\\_%C3%84gidius\\_\(Gelchsheim\)](http://wuerzburgwiki.de/wiki/St._%C3%84gidius_(Gelchsheim)) [Stand: 08.08.15, zugegriffen am 22.09.15]
- Ytterberg CN (1996) Flatness Tolerances for Random-Traffic Floors, Technical Report, The Aberdeen Group.