

Aufdecken von Baumängeln aus Punktwolken

Christian THURNER

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Begriffsdefinition	1
1.1	Was ist ein Baumangel?	2
	Baumangel laut BGB	2
	Baumangel laut VOB/B	3
1.2	Was sind die „Anerkannten Regeln der Technik“?	3
1.3	Was ist eine Verformung?	3
2	Korrekte Anwendung der DIN 18202 um Mängel an einem Bauwerk festzustellen	4
3	Möglichkeit der Einbettung von Planabweichungen in das BIM- Modell durch ein verformungsgerechtes Overlay	4
4	Schwierigkeiten bei der Erstellung aussagekräftiger Punktwolken	5
5	Probleme beim Erkennen und Analysieren von Planabweichungen	7
6	Aufdecken von Baumängeln mithilfe statischer Berechnung	8
7	Automatisierte Erstellung eines verformungsgerechten Overlays	13
8	Zusammenfassung und Ausblick	13
	Literatur	14

1 Einleitung und Begriffsdefinition

Das vorliegende Paper beschäftigt sich mit der Beurteilung von Baumängeln anhand des Vergleiches von Punktwolken mit Planungsdaten und die Einbindung der Baumängel in BIM.

Durch den erhöhten Einsatz von Laserscannern auf Großbaustellen werden immer mehr Planabweichungen und Baumängel aufgedeckt. Ein Baumangel führt auf verschiedene Weise zu Zusatzkosten, bei denen es zu klären gilt, wer sie zu tragen hat. Dieses Paper zeigt einen Ansatz, wie, ausgehend von einer aufgedeckten Planabweichung, ein Baumangel bestätigt oder ausgeschlossen werden kann. Gleichzeitig kann die hier gezeigte Vorgehensweise einen Hinweis auf die Herkunft des Baumangels geben.

Es stellt sich die Frage, wie mit den aufgedeckten Planabweichungen und Mängeln in Bezug auf das BIM-Modell umzugehen ist. Hier wird eine mögliche Vorgehensweise beschrieben bei der, zusammen mit der Analyse der Planabweichung eines verformten Bauteils, das Bauteil verformungsgerecht modelliert wird. Anschließend kann dieses Modell des Bauteils als Overlay in das BIM-Modell eingebettet werden.

Das Paper führt zunächst durch Begriffsdefinitionen zur korrekten Anwendung der Norm um Baumängel festzustellen. Weiterhin wird gezeigt, wie im BIM-Modell mit den festgestellten Planabweichungen umgegangen werden kann. Da das Erkennen von Planabweichungen eine aussagekräftige Punktwolke erfordert, wird zunächst auf die Problematik bei der Erstellung einer solchen Punktwolke eingegangen, bevor gezeigt wird, dass diverse Störeinflüsse auf die Punktwolke das Interpretieren von aufgedeckten Planabweichungen schwierig machen. Wie eine Punktwolke analysiert werden kann, macht das anschließende praktische Beispiel deutlich. Das nächste Kapitel stellt die automatisierte Erzeugung eines Overlays direkt aus der Analyse der Planabweichungen vor, bevor mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick abgeschlossen wird.

1.1 Was ist ein Baumangel?

Aus juristischer Sicht handelt es sich bei einem Mangel um eine Abweichung zwischen dem ausgeführten Ist- und dem vertraglich vereinbarten Soll-Zustand einer Sache. Tritt ein Mangel an einer Sache auf, hat der Besteller laut §634 BGB das Recht auf Mangelbeseitigung, Nacherfüllung, Vertragsrücktritt oder Schadensersatz.

In der Baubranche gibt es grundsätzlich zwei verschiedene, juristische Definitionen von Baumängeln: Einmal im BGB (Bürgerliches Gesetzbuch) und in der VOB/B (Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen). Der Deutsche Vergabe- und Vertragsausschuss hat mit der VOB ein Normwerk geschaffen das im Gegensatz zum BGB den vertraglichen Besonderheiten des Bauvertrags Rechnung tragen soll (Schmidt-Morsbach, 2019). Die größten allgemeinen Unterschiede zwischen VOB/B und BGB liegen in den Abrechnungen, da mit der VOB/B, im Gegensatz zum BGB, z.B. Abschlagszahlungen möglich sind. Das wird hier aber nicht weiter thematisiert.

Im Folgenden wird zunächst die Definition des Baumangels nach BGB vorgestellt, um dann im Vergleich mit der Definition des Baumangels nach VOB/B die Unterschiede der beiden Definitionen aufzuzeigen.

Baumangel laut BGB

Laut §633 Abs. 1 BGB wird vom Auftragnehmer verlangt, dem Auftraggeber das Werk frei von Sach- und Rechtsmängeln zu verschaffen. Ein Rechtsmangel liegt dann vor, wenn ein Dritter in Bezug auf die Sache (z.B. Immobilie, Bauwerk,...) seinerseits Rechte gegen den Käufer geltend machen kann, vorausgesetzt die Rechte sind nicht im Kaufvertrag übernommen (§633 Abs.3 BGB). Solche Rechtsmängel sind z.B. Verstöße gegen gewerbliche Schutzrechte oder Urheberrechte Dritter, was in diesem Artikel jedoch keine weitere Relevanz hat.

Nach §633 Abs.2 S.1 BGB ist das Werk frei von Sachmängeln, wenn es der vereinbarten Beschaffenheit entspricht.

Weißenfels et al. (2019a) beschreiben ihn ihrem Baurecht- Ratgeber sehr anschaulich was das bedeutet. Das Gesetz legt mit oben genanntem Paragraph fest, dass die Grundlage zur Klärung für die Mangelfrage zunächst die vertraglichen Vereinbarungen sind. Haben die Vertragsparteien Vereinbarungen zur Art, Güte und Qualität getroffen und weicht das hergestellte Bauwerk zum Zeitpunkt der Abnahme von dieser Vereinbarung negativ ab, ist das Werk mangelhaft. Wenn z.B. vertraglich vereinbart ist, dass eine Tiefgarage pfützenfrei auszuführen ist, so ist das Werk mangelhaft sobald eine Pfütze entsteht, auch wenn das gesamte Bauwerk inkl. der Tiefgarage alle Normen und gängigen Ebenheiten einhält.

Da es unmöglich ist alle geschuldeten Beschaffenheiten in Bauverträgen zu regeln, enthält das BGB für letztere eine genauere Definition, §633 Abs.2 S.2f:

„Soweit die Beschaffenheit nicht vereinbart ist, ist das Werk frei von Sachmängeln,

1. wenn es sich für die nach dem Vertrag vorausgesetzte, sonst
2. für die gewöhnliche Verwendung eignet und eine Beschaffenheit aufweist, die bei Werken der gleichen Art üblich ist und die der Besteller nach der Art des Werkes erwarten kann.“

Eine „übliche Beschaffenheit“ wird vor den Gerichten bevorzugt durch die sogenannten „anerkannten Regeln der Technik“ (d.i. z.B. die DIN, s.u.) festgelegt. Das ist so zwar nicht im BGB geregelt, aber die Mehrzahl der gerichtlichen Entscheidungen über Mängelfragen zeigen, dass dies in der Praxis die gängige Vorgehensweise ist. Rechtlich wird es so gehandhabt, dass davon ausgegangen werden muss, die meisten Parteien hätten die Einhaltung der Regeln der Technik stillschweigend vereinbart.

Wo es keine „anerkannten Regeln der Technik“ gibt oder bei sonstigen Zweifeln wird durch einen Sachverständigen geklärt, ob ein Mangel vorliegt oder nicht.

Baumangel laut VOB/B

Nach §13 Nr.1 VOB/B liegt ein Mangel dann vor, wenn mindestens einer der folgenden Punkte gegeben ist:

- Nichteinhaltung der vereinbarten Beschaffenheit
- Verstoß gegen die anerkannten Regeln der Technik.

Der größte Unterschied in der Definition des Mangels im BGB und in der VOB/B liegt darin, dass die VOB/B den Begriff des Rechtsmangels nicht kennt. Wird ein Bauwerk nach VOB/B errichtet und liegt ein Rechtsmangel vor, bleibt es bei der Anwendung der Gewährleistungsrechte des BGB.

Ein kleiner Unterschied zwischen BGB und VOB/B besteht darin, dass die VOB/B im Gegensatz zum BGB die „anerkannten Regeln der Technik“ schon in der Definition des Baumangels beinhaltet.

1.2 Was sind die „Anerkannten Regeln der Technik“?

Weißenfels et al. (2019b) zeigen, dass die Definitionen der „anerkannten Regeln der Technik“ sowohl nach dem BGB als auch nach der VOB/B nicht zwingend eindeutig sind. Im Allgemeinen gilt für die „anerkannten Regeln der Technik“, dass sie in der technischen Wissenschaft als theoretisch richtig und gleichzeitig aufgrund praktischer Erfahrung als technisch geeignet, angemessen und notwendig anerkannt sind.

Aufgrund dieser Handhabung der „anerkannten Regeln der Technik“ wird keine schriftliche Fixierung ebendieser notwendig. Damit wird es zur Frage des Einzelfalls ob sich auf der Baustelle die technischen Regeln als wissenschaftlich richtig und geeignet erweisen. In der Praxis werden die „anerkannten Regeln der Technik“ durch Normen wie die DIN- Normen, VOB, Europäische Norm (EN), Richtlinien des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI), Schweizer Ingenieur- und Architektenverein (SIA- Norm), etc. umgesetzt.

1.3 Was ist eine Verformung?

In der Kontinuumsmechanik ist eine Verformung die Änderung der Form eines Körpers aufgrund einer äußeren Kraft. Rösler et al. (2006) beschreiben in ihrer Arbeit sehr detailliert das Verhalten von Materialien unter Krafteinwirkung.

Eine Verformung besteht aus einem elastischen und einem plastischen Anteil. Ein elastisch verformter Werkstoff nimmt seine ursprüngliche Form wieder an sobald die Krafteinwirkung aufhört. Die plastische Verformung hingegen ist irreversibel. Hierfür muss der Werkstoff umformbar sein. Sehr spröde Werkstoffe brechen eher ohne sich nennenswert plastisch zu verformen.

Ein Material kann auch zeitlich verzögert auf eine Belastung reagieren. Hierbei spricht man dann von einer zeitabhängigen Verformung.

Es gibt also vier Arten von Verformungen: die elastische und die plastische Verformung, die jeweils zeitlich abhängig oder unabhängig sein können.

Eine Verformung muss somit kein Baumangel sein.

2 Korrekte Anwendung der DIN 18202 um Mängel an einem Bauwerk festzustellen

Ertl (2013) zeigt in seinem sehr hilfreichen Kommentar zur DIN 18202 (Zulässige Maßabweichung im Roh- und Ausbau) wie die DIN 18202 in der Praxis anzuwenden ist.

Mit der DIN 18202 sind nur die Genauigkeitsanforderungen für die Ausführung von Bauwerken bzw. Bauteilen erfasst. Nicht erfasst sind ausdrücklich zeit- oder lastabhängige Verformungen nach der Herstellung des Bauwerks oder Bauteils. D.h. mit der DIN 18202 können nur Maße unmittelbar nach der Fertigstellung kontrolliert werden. Damit ist klar, dass die DIN 18202 ein Beurteilungsmaßstab für die maschinelle Fertigung bzw. die handwerkliche Ausführung ist. Somit ist es lediglich möglich den Herstellungsprozess zu beurteilen.

Verformungen, die nicht unmittelbar mit der Herstellung zusammenhängen, fallen also nicht in den Anwendungsbereich der DIN 18202. Beispiele hierfür sind zeitabhängige Verformungen wie das Quellen oder Schwinden aufgrund von Wasserabgabe oder -aufnahme. Aber auch temperaturbedingte Verformungen oder Verformungen aufgrund von andauernden oder temporären Lasten wie z.B. Eigengewicht, Verkehrs- oder Windlast werden nicht berücksichtigt. Das betroffene Bauteil muss somit um den Anteil derartiger Verformungen korrigiert werden, damit die Norm Anwendung finden kann.

Um die Anteile zusätzlicher Verformungen (z.B. durch Belastung des Bauteils) zu ermitteln, müssen andere Vorgehensweisen genutzt werden, siehe Kap.6.

3 Möglichkeit der Einbettung von Planabweichungen in das BIM- Modell durch ein verformungsgerechtes Overlay

Bereits 2013 zeigten Egger et al. in ihrem BIM- Leitfaden auf, dass BIM als zentrale Verwaltung von möglichst allen projektrelevanten Informationen verwendet werden sollte. Das bestätigt und erweitert zugleich Kaden et al. (2018) im Leitfaden Geodäsie und BIM, wenn vom „multidimensionalen Bauwerksmodell und darüber hinaus“ gesprochen wird. Thurner

und Wunderlich (2015) argumentieren aus dieser Tatsache, dass nicht nur das geplante Modell als Informationsgrundlage geführt und gepflegt, sondern auch das hergestellte Bauwerk aufgemessen und verformungsgerecht modelliert werden sollte. Denn nur wenn der tatsächlich hergestellte Zustand als Modell zur Verfügung steht, kann von einer „Verlässlichen Grundlage für Entscheidungen“ nach der Vorstellung von NBIMS (2012) gesprochen werden. Kaden et al. (2018) widmen der Bestandserfassung für BIM ein gesamtes Kapitel, jedoch wird BIM dort als eine zentrale Methode für die digitale Planung eines Bauwerks beschrieben. Die Bestandserfassung die Kaden beschreibt meint also das Schaffen der Planungsgrundlage. Auch die Baukontrolle, Kontrollvermessung und Beweissicherung sprechen Kaden et al. in einem kurzen Kapitel an. Kaden et al. schlagen vor, wenn Planabweichungen auftauchen, entweder das Bauwerk zu korrigieren oder das Modell entsprechend der Realität anzupassen.

Thurner und Wunderlich (2015) zeigen zusätzlich, dass durch ein Gebäudeaufmaß in der Detailstufe wie es BIM verlangt, deutlich mehr Planabweichungen aufgenommen werden, als es ohne BIM der Fall war. Auf der modernen Großbaustelle jedoch, vorausgesetzt die Punktwolke des fertigen Bauwerks und das BIM-Modell sind beide im selben Bezugssystem, können Planabweichungen sichtbar gemacht werden, indem der Abstand zwischen der Punktwolke und dem Modell farbcodiert und die Punktwolke entsprechend eingefärbt wird. Nahezu jede Software bietet hierfür ein Tool an.

Da Planabweichungen, wenn sie sich als Baumängel herausstellen, zu einer juristischen Angelegenheit werden (siehe Kap.1), muss geklärt werden, wie mit den deutlich mehr aufgedeckten Planabweichungen umzugehen ist. Wie bereits oben beschrieben können Planabweichungen die ein Toleranzmaß überschreiten (z.B. aus der DIN) erkannt werden. Als nächstes wird geprüft, ob es sich bei dem betroffenen Bauteil tatsächlich um einen Baumangel handelt oder nicht (vgl. Kap.6). Wird ein Baumangel ausgeschlossen, kann das entsprechende Bauteil freigegeben werden. Handelt es sich jedoch um einen Baumangel, so muss entschieden werden, was mit dem betroffenen Bauteil passiert. Bis zur endgültigen Entscheidung kann z.B. das verformungstreu modellierte Bauteil im BIM- Modell als Overlay eingebettet werden. So ist es möglich den Mangel im Modell für jeden Betroffenen sichtbar zu dokumentieren. Eine Möglichkeit ein verformungstreu Overlay zu erstellen, zeigt Kap.7. Wird das Bauteil in der Realität nachgebessert oder ersetzt, kann das Overlay einfach entfernt oder angepasst werden. Wird das Bauteil so belassen, da sich die Vertragspartner z.B. auf eine verminderte Vergütung geeinigt haben, kann die entsprechende Information dem Overlay des Bauteils hinzugefügt werden. Die Regelung bezüglich dieses Baumangels ist somit eindeutig und für alle Beteiligten sichtbar hinterlegt. Zudem dient das Overlay des Bauteils als Grundlage für weitere Planungen. Soll z.B. unter einem Unterzug eine Trennwand aus Glas eingebracht werden so kann es bei der Planung entscheidend sein, ob der Unterzug aufgrund eines Baumangels zu stark durchgebogen ist oder nicht.

4 Schwierigkeiten bei der Erstellung aussagekräftiger Punktwolken

Die Scans finden meistens noch im Rohbauzustand statt und zu dem Zeitpunkt ist die Baustelle i.d.R. alles andere als aufgeräumt. Sprieße, Gerüste, Brüstungen, Geländer, Material, Schutt und vieles mehr wird mitgescannt. Die Punktwolke muss gründlich bereinigt werden,

ansonsten erscheinen diese Objekte beim Vergleich zwischen Modell und Punktwolke als Pseudomodellabweichung. Ohlmann- Lauber (2012) befasst sich mit der Thematik der Pseudodeformationen in Tunnels. Beim Scan des Rohbaus kann selbstverständlich nur der Zustand des Rohbaus mit dem Modell des Rohbaus verglichen und im BIM dokumentiert werden. Um also ein verformungsgerechtes Modell des fertigen Bauwerks erzeugen zu können, müsste nach Abschluss des Innenausbaus erneut gescannt werden. Wird nur nach Fertigstellung des Bauwerks gescannt, so kann der Rohbau bis auf Ausnahme von Sichtbetonelementen nicht überprüft und modelliert werden.

An dieser Stelle sei nochmal darauf hingewiesen, dass ein BIM- Modell nach NBIMS (2012) eigentlich verlangt, das Gebäude im Rohbau und im fertigen Zustand verformungsgerecht zu erfassen und zu dokumentieren sind. Unserer Erfahrung nach, ist ein solcher Aufwand zum momentanen Zeitpunkt weder nötig noch wirtschaftlich.

Üblicherweise werden auf Großbaustellen bislang nicht alle Bauteile explizit kontrolliert. Oft beschränken sich die Kontrollmessungen auf Ebenheitskontrollen und speziell angeforderter Kontrollmessungen kritischer Bauteile. Wird auf einer Baustelle hierfür ein Laserscanner verwendet, so könnten mehr Bauteile kontrolliert werden. Die Scans erfolgen i.d.R. wenige Wochen nach der Fertigstellung eines Bauteils, nach der Ausschalung der Decke und dem Entfernen des Großteils der Sprieße, immer jedoch bevor der Innenausbau beginnt (Tachymetrische Ebenheitskontrollen erfolgen i.d.R. am Tag nach der Betonage, was beim Scannen aufgrund der Folie auf den frischen Deckenfeldern unmöglich ist). Somit ist der Scan zwar nicht der direkten Witterung, jedoch der Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankung über die Jahreszeiten ausgesetzt. Aus diesen, von den Umweltbedingungen abhängigen Einzelscans, wird die Gesamtpunktwolke des Gebäudes zusammengesetzt. Eine Temperaturschwankung von bis zu 40°C zwischen den Sommer und Wintermonaten muss erwartet werden. Werden solche Umwelteinflüsse in der Analyse nicht berücksichtigt, kann die Aussagekraft der Gesamtpunktwolke beim Aufdecken von Maßabweichungen angezweifelt werden.

Der jeweilige Scan eines Gebäudeteils kann aber nur als Grundlage zur Kontrolle von Maßabweichungen desselben Bauteils herangezogen werden. Wie Boschè und Biotteau (2015) und Heunecke (2014) zeigen, reicht die Genauigkeit eines Laserscanners i.d.R. aufgrund der hohen Redundanz durch die hohe Punktdichte aus, um Aussagen aus dem Scan wie z.B. Ebenheitskontrollen treffen zu können. Die Ebenheitskontrolle kann aus Scandaten mithilfe der 2D Continuous Wavelet Transformation automatisiert werden (Valero und Boschè, 2016).

Viel leichter umzusetzen ist das verformungsgerechte Aufmaß eines bereits bestehenden Bauwerks, für das ein BIM inklusive Modell angelegt werden soll. Das geschieht oft zum Schaffen von Planungsgrundlagen damit BIM konform mit digitaler Planung umgebaut oder erweitert bzw. saniert werden kann, was Kaden et al. (2018) klar machen. Hierfür gibt es bereits bestimmte Vorschriften in welcher Genauigkeit und welchem Detaillierungsgrad welche Objektklassen zu erfassen sind. Des Weiteren stellen Kaden et al. (2018) fest, dass die Darstellung der Abweichungen zur Regelgeometrie aufgrund der BIM- Software nur sehr eingeschränkt möglich ist, weshalb ein verformungsgerechtes Aufmaß zurzeit nur im Sinne der Baukontrolle durchgeführt werden kann. Damit meint Kaden den Abgleich des Gebauten mit der BIM-Planung.



Spiegelung an der Oberfläche z.T. erhebliche Datenlücken erzeugen. Dies bewirkt zusammen mit den unzähligen Gegenständen auf Großbaustellen (Kap.4), dass die tatsächlich verwendeten Scandaten oft sehr große Lücken aufweisen. Vor allem Pfützen sind in diesem Zusammenhang zu betonen. Die Tatsache, dass eine Pfütze entsteht, zeigt, dass an dieser Stelle die Decke niedriger betoniert wurde als in der Umgebung, ansonsten würde sich das Wasser nicht sammeln. Genau diese Stelle wird vom Scanner nicht erfasst. Selbst wenn die Ebenheitskontrolle durch Laserscanner laut Valero und Boschè (2016) automatisierbar ist, ist das in der Praxis auf Großbaustellen oft kein Vorteil, da die kritischen Stellen häufig gar nicht erfasst werden. Aus diesem Grund ist ein herkömmliches Aufmaß eines Deckenfeldes mittels Tachymeter meist schneller durchführbar und aussagekräftiger als ein Laserscan, insbesondere bei Ebenheitskontrollen. Das führt dazu, dass eigentlich für die BIM- gerechte Gebäudedokumentation, wie oben beschrieben, separat gescannt werden müsste. Das wird, unserer Erfahrung nach, bislang noch nicht bezahlt.

Eine Aussage zur Maßabweichung kann nur außerhalb des Bereichs des Messrauschens eines Scanners erfolgen. Heinz et al. (2018) befasst sich mit Genauigkeitsbeurteilung von Laserscans anhand realer Messobjekte. Heinz kommt zum Schluss, dass zwischen 10 und 55m Messdistanz auf eine Rauputzwand und eine Sichtbetonwand ein Messrauschen zwischen 2-7mm bei eigentlich allen getesteten Laserscannern von Low- Cost bis High- End Geräten zu erwarten ist. Die Daten für seinen Beitrag wurden allerdings auch nicht auf einer Großbaustelle in vollen Baubetrieb erzeugt. Die Praxis hat uns gelehrt, dass beim Einsatz eines Scanners im Tagesgeschäft einer Großbaustelle (d.h mit zusätzlichen zu erwartenden unbekanntem systematischen Abweichungen aufgrund eines nicht kalibrierten und durch den Transport z.B. über Leitern geschüttelten Scanners) mit einer Gesamtabweichung von 10-20mm zu rechnen ist, was jedoch im Einzelfall zu prüfen wäre. Entsprechend könnten im schlechtesten Fall nur Aussagen zu Planabweichungen größer 2cm getroffen werden. Somit kann es schwer werden, etwaige festgestellte Planabweichungen aussagekräftig zu analysieren.

Bei manchen Oberflächen, vor allem von unplanmäßig tordierten Objekten wie es häufig bei Massivholzbalken der Fall ist, treten große Probleme auf. Hierbei wird es schwierig Punktwolken auf Planabweichungen zu untersuchen, da für solche Szenarien eine automatisierte Punktwolkenverarbeitung fehlt.

6 Aufdecken von Baumängeln mithilfe statischer Berechnung

In Kap.2 wurde bereits gezeigt, dass Bauteile nur dann auf Maßüberschreitungen geprüft werden können, wenn das Aufmaß des zu prüfenden Bauteils um jede zusätzliche Verformung, z.B. aus der Belastung eines Bauteils, korrigiert wird.

Aus statischen Berechnungen ist bekannt, wie sich ein Bauteil erwartungsgemäß verformen wird. Liegen nun aussagekräftige Aufmaßdaten eines Bauteils vor (siehe Kap.4-5), so kann das Aufmaß mit der Statik verglichen werden. Im Idealfall unterscheidet sich die vorhergesagte Verformung aus der statischen Berechnung nicht bzw. nicht wesentlich von der tatsächlich gemessenen Verformung des Bauteils. Thurner und Wunderlich (2015) zeigen mit Hilfe eines individuellen Ansatzes auf, welche Ableitung ein solcher Vergleich möglich macht.

Zur Verdeutlichung der Vorgehensweise wird ein Einfeldbiegeträger analysiert. Hierbei handelt es sich um einen Balken, der waagrecht auf zwei Auflagern gelenkig gelagert ist. Ein

Auflager ist in Längsrichtung des Balkens beweglich, damit es Längenänderungen z.B. aufgrund thermischer Einflüsse, aufnehmen kann. Dies ist ein statisch bestimmtes System, da die Anzahl der möglichen Lagerreaktionen gleich der Anzahl der möglichen Bewegungsrichtungen ist. Für die Anwendung dieses Ansatzes in der Praxis, sollte die statische Berechnung von einem Statikbüro angefordert werden.

Um die Vorgehensweise zu verdeutlichen, wird der reale Scan eines Balkens in ein Beispiel eingebaut. Gescannt wurde ein weiß lasierter massiver Leimbinderbalken auf einer Distanz von 8-16m und mit Einfallswinkel zwischen 30 und 45°. Der verwendete Scanner war ein Faro Focus 70 mit einer Distanzgenauigkeit laut Hersteller von 3mm.

Für das Beispiel wird ein 10,9m langer Leimbinderbalken mit den Querschnittsmaßen $b \times h$ mit $20 \times 60\text{cm}^2$ analysiert. Der Balken ist Teil der Dachkonstruktion einer 4m hohen Montagehalle. Alle zur Berechnung der Biegelinie benötigten Informationen sind gegeben. Prof. Dr. Schröder hat eine sehr übersichtliche Formelsammlung zur Verformung durch Durchbiegung veröffentlicht. Diese dient hier als Berechnungsgrundlage (Schröder, 2019).

Der Balken wird durch eine Linienlast q [kN/m] belastet. q setzt sich aus der Summe der ständigen Lasten und der Summe der veränderlichen Lasten zusammen. Im vorliegenden Fall ist die ständige Last das Eigengewicht des Balkens und der darüber liegenden Dachkonstruktion. Die veränderlichen Lasten setzen sich aus der Schnee- und der Windlast zusammen. Da es sich um eine Dachkonstruktion handelt, kommen keine Nutzlasten wie z.B. Personen dazu. Aus der DIN 1055 können die Rechenwerte und die Bemessungsregeln zur Planung von Bauwerken entnommen werden. Konkret finden sich in der DIN 1055-4 die Rechenwerte zur Windlast und in der DIN 1055-5 die Rechenwerte zur Schnee- und Eislast. q sei somit aus der statischen Berechnung gegeben mit:

$$q = 5,4825 \text{ kN/m} \quad (1)$$

Das Elastizitätsmodul E ist entsprechend der verwendeten sehr guten Holzqualität gegeben (Tabelle F.5, DIN 1052):

$$E = 12,5 \times 10^9 \text{ Pa} \quad (2)$$

Das Flächenträgheitsmoment I errechnet sich wie folgt:

$$I = \frac{b x h^3}{12} \quad (3)$$

Jetzt kann die Biegelinie w_x für einen Balken mit konstanter Linienlast und konstantem Querschnitt, mit der Balkenlänge l errechnet werden aus:

$$w_x = \frac{ql^4}{24EI} \left[\frac{x}{l} - 2 \left(\frac{x}{l} \right)^3 + \left(\frac{x}{l} \right)^4 \right] \quad (4)$$

Um einen Vergleich der DIN zu einer anderen Norm zu haben, wird die maximal zulässige Durchbiegung eines Balkens aus der Zif.4.4.4 der SIA- Norm 260 berechnet:

$$w_{max} = \frac{l}{350} \quad (5)$$

Nun wird die berechnete Biegelinie mit dem bereinigten Scan der Unterseite des Balkens verglichen. In Abb.2 ist in hellgrau der in die x- Ebene projizierte Scan zu sehen und in

dunkelgrau die berechnete Biegelinie. Die Biegelinie ist absichtlich 7mm unterhalb der Scandaten gehalten, damit der Plot übersichtlich bleibt. Zu erkennen ist, dass die Gesamtabweichung der Scandaten, zusammengesetzt aus Messrauschen und systematischen Einflüssen, von 5-15mm variiert. Es zeigt sich, dass der Balken um ca.8mm mehr durchgebogen ist, als die Biegelinie erwarten lässt und dass der Balken nicht exakt waagrecht verbaut ist. Die rechte Seite des Balkens ist ca. 10mm höher als die linke Seite. Zufälligerweise biegt sich der Balken mit 31mm exakt nach dem maximal zulässigen Wert für diese Balkenlänge nach der SIA- Norm 260 durch. Ebenso deutlich wird, dass sich der Träger nicht symmetrisch durchbiegt. Das könnte z.B. auf eine etwas einseitige Belastung oder auf einer leicht abweichenden Materialqualität zurückzuführen sein.

Da der Balken erst nach Gebäudefertigstellung gescannt wurde, kann keine Aussage in Bezug zur DIN 18202 getroffen werden, da, wie in Kap.2 beschrieben, die DIN 18202 ausdrücklich keine zeit- oder lastabhängigen Planabweichungen betrachtet. Der Anteil der lastabhängigen Verformung muss von der Durchbiegung abgezogen werden, um bewerten zu können ob der Balken korrekt nach DIN 18202 - also nach den „anerkannten Regeln der Technik“- verbaut wurde. Deshalb wird die Durchbiegung erneut, nur Anhand der Belastung aufgrund des Eigengewichts, berechnet ohne sonstige Lasten wie Verkehrs- und Schneelasten zu berücksichtigen. So wird der Zustand unmittelbar nach dem Einbau theoretisch wiederhergestellt. Die Differenz beider Berechnungen zeigt, dass sich der Balken ohne Belastung (nur durch Eigengewicht) 21mm weniger durchbiegen würde, d.h. er wäre lediglich 10mm durchgebogen.

Zur Kontrolle von Grenzabmaßen an der Unterseite von Decken oder Unterzügen wird die Zeile 4 der Tabelle 1 der DIN 18202 herangezogen. Laut dieser Zeile gilt für „Lichte Maße im Aufriss, z.B. unter Decken und Unterzügen“ bei einem Nennmaß von 4m (lichtes Maß bis an die Balkenunterseite) ein Grenzabmaß von $\pm 30mm$. Nach Anbringung der Korrektur hat sich der Balken zum Zeitpunkt nach der Montage nur um 10mm durchgebogen. Damit wurde der Balken innerhalb der Toleranz, also nach „anerkannten Regeln der Technik“, verbaut. Wäre das Aufmaß nicht DIN 18202 konform interpretiert worden, d.h. wäre die zusätzliche lastabhängige Durchbiegung nicht korrigiert worden, läge mit einer Durchbiegung von 31mm eine Toleranzüberschreitung nach DIN 18202 vor. Die Toleranz nach der Schweizer SIA- Norm 260 wäre trotzdem eingehalten gewesen.

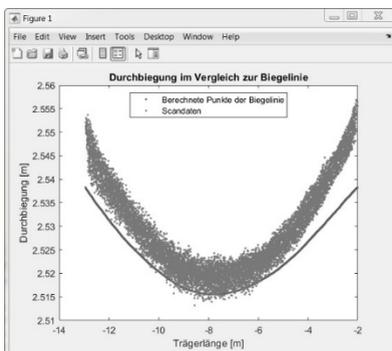


Abb. 2:

Gegenüberstellung des in die x- Ebene projizierten Scans und der Biegelinie. Zu erkennen ist, dass sich der Balken tatsächlich etwas mehr durchbiegt als es die Biegelinie vorhersagt.

Für ein weiteres Beispiel wird wieder ein realer Scan eines Balkens herangezogen. Es handelt sich hierbei ebenfalls um einen weiß lasierten Leimbinderbalken, der zusammen mit dem Balken aus dem ersten Beispiel gescannt wurde.

In diesem Beispiel soll ein 19,4m langen Leimbinderbalken analysiert werden, bei dem eine fiktive, nachträgliche Baumängelanzeige durch den Bauherrn an den zuständigen Bauträger eingegangen ist. Dem Bauherrn ist aufgefallen, dass sich der Balken „seltsam durchbiegt“. Vom Balken ist nur noch ein Teil der Unterseite zu erkennen, da die abgehängte Decke den Balken bis zur halben Höhe verdeckt. Laut Angabe des Bauherrn sei von einem Einfeldbiegeträger auszugehen. Der Balken wird gescannt und wie oben beschrieben ausgewertet. Abb.3 zeigt die Ergebnisse.

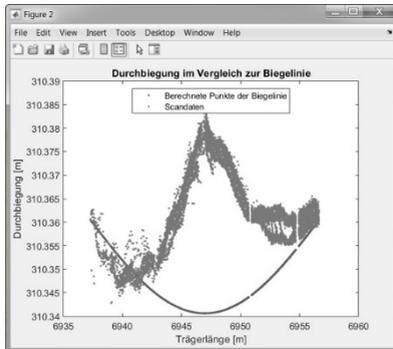


Abb. 3:
Gegenüberstellung des, in die Ebene projizierten, Scans und der Biegelinie. Scan und Biegelinie haben keinerlei Gemeinsamkeiten.

Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen eindeutig, dass bei korrekten Angaben des Bauherrn, grobe Planabweichungen vorliegen. Der Balken biegt sich nicht wie aus der Statik zu erwarten durch. Bei einem Einfeldbiegeträger ist die zu erwartende Durchbiegung immer eine Parabel. Abb.3 zeigt in dunkelgrau mit Hilfe der berechneten Biegelinie an, wie sich ein Einfeldbiegeträger dieser Länge und Belastung durchbiegen sollte. Ganz offensichtlich biegt sich der reale Balken aber nicht parabelförmig durch.

In so einem Fall gibt es nur zwei mögliche Schlussfolgerungen:

1. Die Mängelanzeige des Bauherrn ist berechtigt, da der Balken bereits beschädigt mit dieser Form eingebaut wurde. Z.B. könnte sich der der Holzbalken durch falsche (z.B. feuchte) Lagerung entsprechend verzogen haben. Laut Aussage von Doka Deutschland, ist das die häufigste Ursache eines verzogenen Leimbinders. Das Verziehen eines Leimbinderbalkens nach dem Einbau kann ausgeschlossen werden, indem die Holzfeuchtigkeit an mehreren Stellen des Balkens gemessen wird. Ein derartiger Holzbalken verzieht sich nur, wenn die Holzfeuchtigkeit zu hoch ist. Zudem sollten, wenn möglich, auch noch die Stirnseiten eines verzogenen Leimbinderbalkens begutachtet werden, ob die übereinander geleimten Bretter korrekt (Faserrichtung etc.) und in der richtigen Materialqualität verbaut sind. Wie sich Hölzer in den verschiedenen Gütequalitäten in Bezug auf Rissbildung, Längskrümmung und Verdrehung verhalten, regelt die DIN 4074.
2. Die Mängelanzeige ist nicht berechtigt, da es sich nicht um einen Einfeldbiegeträger handelt.

In diesem konkreten Fall trifft der zweite Punkt zu. Es handelt sich nicht um einen Einfeldbiegeträger, sondern um ein Fachwerk. Abb.4 zeigt die vollständige Tragkonstruktion aus dem BIM- Modell des real gescannten Balkens. In diesem Fall kann der Balken also nicht mit der Biegelinie eines Einfeldträgers verglichen werden. Dieses Fachwerk lässt eine solche Biegelinie erwarten, wie sie der Scan gezeigt hat.



Abb. 4: Gut zu erkennen sind die typischen Felder eines Fachwerks. Die dünnen Bänder in den Feldern sind auf Zug belastet, die senkrechten Balken auf Druck.

In Abb. 3 fällt noch auf, dass die Punkte zum Teil stark streuen. Das kommt daher, dass es sich um einen Massivholzbalken handelt der sich im Laufe der Zeit verdreht hat, wodurch große Risse entstanden sind. Dieses Beispiel zeigt konkret wie schwierig es sein kann, unregelmäßig tordierte Bauteile, wie z.B. einen Massivholzbalken, zu analysieren (vgl. Kap.5).

Das zweite Beispiel wird nicht bis zum Ende durchanalysiert, da es hier nur um die Vermittlung des Prinzips und der Möglichkeiten geht.

7 Automatisierte Erstellung eines verformungsgerechten Overlays

Für die Analyse in Kap.6 wird durch die in die Ebene projizierte Punktwolke (vgl. die Scan-
daten in Abb.2) der betrachteten Trägerunterseite ein Polynom vom Grad n mittels der Me-
thode der kleinsten Quadrate angepasst. Die Stirnseiten des modellierten Trägers bilden sich
aus dem Trägerquerschnitt, der aus der statischen Berechnung bekannt ist (siehe Kap.6). Die
Seitenflächen werden vom angepassten Polynom als Längskanten des Trägers begrenzt.
Dadurch entsteht ein modellierter Balken, der die mittlere Durchbiegung der Balkenunter-
seite darstellt. Aus dem ersten Beispiel in Kap.6 ergibt sich ein parabelförmig durchgeboge-
ner Balken, der in Abb.5 dargestellt ist. Das Potential eines derartigen Overlays wurde in
Kap. 3 gezeigt.

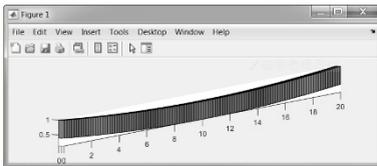


Abb. 5: Automatisch modellierter Balken aus dem Analy-
seprozess der tatsächlichen Durchbiegung.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Das Paper verdeutlicht die Schwierigkeiten Bauteile auf Baumängel zu untersuchen und geht
dabei explizit auf die korrekte Anwendung der Norm in diesem Zusammenhang ein. Danach
wird die Möglichkeit und das Potential gezeigt, welches sich durch ein Integrieren der detek-
tierten Baumängel mittels Overlay in das BIM- Modell ergibt, weil es auf diese Weise mög-
lich wird, Zusatzleistungen zu dokumentieren, die wiederum eine echte Grundlage für weite-
re Planungsleistungen bilden. Anschließend wird sowohl auf die Problematik der Erstel-
lung aussagekräftiger Punktwolken eingegangen (die für die Detektion von Baumängeln ent-
scheidend sind), als auch auf die Schwierigkeit des Erkennens und der Interpretation von
Planabweichungen, da die Aussagekraft jeder Punktwolke durch Rauschen, sonstiger Abwei-
chungen und Datenlücken beeinträchtigt ist. Daraufhin wird gezeigt, wie eine bereinigte und
aussagekräftige Punktwolke durch korrekte Anwendung der Norm auf Baumängel untersucht
werden kann. Dabei werden zusätzliche Verformungen eines belasteten Bauteils mithilfe
strukturmechanischer Prädiktion korrigiert. Die Ergebnisse dieses Analysevorganges können
verwendet werden, um das verformungstreue Overlay des betroffenen Bauteils automatisiert
zu erstellen.

Die automatische Erstellung des Overlays bietet zusätzliches Potential dadurch, dass nicht
mehr nur ein einzelnes Polynom in den Scan angepasst wird, sondern mehrere bzw. Frei-
formflächen. Auf diese Weise wird es auch möglich tordierte oder sonstige komplexere Bau-
teile zu modellieren.

Als nächsten Schritt gilt es die tatsächliche Abweichung eines Scanners zu ermitteln um aus-
sagekräftige Analysen machen zu können. Dazu hat Heinz (2018) einen wichtigen Beitrag
geleistet (vgl. Kap.5). Aber auch Wunderlich et al. (2013), der sich mit der Vergleichbarkeit
von terrestrischen Laserscannern beschäftigt, oder Lindstaedt et al. (2012), der sich mit der
gemeinsamen geometrischen Genauigkeitsuntersuchung verschiedener Scanner befasst.

Auch Stenz et al. (2017) zeigen verschieden Methoden zur Qualitätsuntersuchung von Scannern. Diese wertvollen Beiträge sind unter sehr guten Umweltbedingungen entstanden, weshalb es für die hier vorliegende Arbeit noch nötig wird, die Genauigkeit von Scannern im laufenden Betrieb einer Großbaustelle zu untersuchen. Dazu gehört auch der harte und ruppige Umgang mit dem Messequipment.

Es ist auch nötig einen statistischen Test einzubauen, mit dem es möglich wird aussagekräftig und juristisch stichhaltig belegen zu können, ob es sich bei der aufgedeckten Planabweichung um einen Baumangel handelt oder nicht. Da bei der hier gezeigten Vorgehensweise in den Scan des Einfeldbiegeträgers eine ausgleichende Parabel angepasst wird, kann aus den Ergebnissen der Ausgleichung, über die Standardabweichungen der Beobachtungen geprüft werden, ob es sich aller Wahrscheinlichkeit nach um eine Parabel handelt oder nicht (bei anderen statischen Systemen handelt es sich natürlich nicht um eine Parabel). Vorausgesetzt das Unsicherheitsbudget des Scanners ist bekannt und systematische Fehler in den Daten sind ausgeschlossen (vgl. Kap.3-5). Die Information, ob die tatsächliche Durchbiegung der vorhergesagten Durchbiegung aus der Biegelinie ähnelt, hat großes Potential. Ist bei einem Einfeldträger aus dem Scan statistisch nachweisbar, dass der Balken parabelförmig durchgebogen ist, jedoch stärker als zulässig, so wurde der Balken entweder zu stark belastet oder zu schwach ausgeführt bzw. zu schwach dimensioniert. Auch die Verwendung der falschen Materialqualität oder ein Verarbeitungsfehler (z.B. zu frühes Ausschalen oder Entfernen der Spröße bei Beton) sind denkbar. Ist der Balken jedoch statistisch nachweisbar nicht parabelförmig durchgebogen so liegt der Schluss nahe, dass der Balken in der Herstellung beschädigt, oder fehlerhaft hergestellt wurde (z.B. durch die Verwendung fehlerhafter Schalungselemente).

Literatur

- BOSCHÈ, F. UND BIOTTEAU, B. (2015) Laser Scanning and the Continuous Wavelet Transformation for Flatness Control. In: International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 2015 Proceedings of the 32th ISARC, OULU, Finland, S.1-7.
- 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.
- ERTL, R. (2013) Toleranzen im Hochbau, Kommentar zur DIN 18202 – Zulässige Maßabweichung im Roh- und Ausbau. Rolf Müller Verlag, Auflage 3, 24.Sept.2013. S.26.
- HEINZ, E., MEDIĆ, T., HOLST, C., KUHLMANN, H. (2018): Genauigkeitsbeurteilung von Laserscans Anhand Realer Messobjekte. In: Terrestrisches Laserscanning 2018 (TLS 2018). DVW-Schriftenreihe, Band 93, 41–56. Wißner Verlag, Augsburg.
- HEUNECKE, O. (2014) Eignung geodätischer Messverfahren zur Maßkontrolle im Hochbau. In: zfv 4/2014 Fachbeitrag, S.241-251.
- IGL (2015) Scan der Kirche St. Ägidius in Gelchsheim. Ingenieurgesellschaft Gemmer und Leber mbH., 23.07.15.
- KADEN, R., CLEMEN, C., SEUß, R., BLANKENBACH, J., BECKER, R., EICHHORN, A., DONAUBAUER, A., KOLBE T.H., GRUBER, U. (2018) Leitfaden Geodäsie und BIM. DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V. und Runder Tisch GIS e.V. Version 1.2 vom 01.Oktober 2018. S.18-19+ S.70+S.73-75.

- LINDSTAEDT, M.; KERSTEN, T.; MECHELKE, K.; GRAEGER, T. (2012): Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner – Gemeinsame geometrische Genauigkeitsuntersuchungen verschiedener Laserscanner an der HCU Hamburg. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012, Wichmann, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 264–275.
- LINGEL, A. (2017) Bestandsaufnahme vom 26.Juli 2017, Schnitt 4.
- NBIMS (2012) National Institute of Building Science. United States National Building Information Modeling Standard, Version 2.0. <http://www.nationalbimstandard.org/faq.php#faq1>
- OHLMANN-LAUBER, J. (2012) Filterungsansätze zur Bestimmung flächenhafter Deformationen aus TLS- Daten. In: Tagungsband DVW- Seminar, TLS2012.
- RÖSLER, J., HARDERS, H. UND BÄKER, M. (2006) Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. 2. durchgesehene und erweiterte Auflage, B.B. Teubner Verlag, GWV Fachverlag GmbH, Wiesbaden 2006, Kap.2.
- SCHMIDT-MORSBACH, M. (2019) VOB/B. Homepage der Kanzlei Schmidt-Morsbach & Partner. <https://www.rasmp.de/bau-und-immobilienrecht-berlin/privates-baurecht/vob-baurecht-sicherheit> (17.09.19).
- SCHRÖDER, C. (2019). Konstruktionsmechanik. Lehrmaterial, Fachhochschule Gelsenkirchen. S.83-89. https://www.w-hs.de/fileadmin/public/dokumente/erkunden/fachbereiche/FB2_ElaN/FB2_ElaN_PT/Lehre/FuCAD/formeln-fest3.pdf (18.09.19).
- STENZ, U.; HARTMANN, J.; PAFFENHOLZ, J.-A.; NEUMANN, I. (2017): A Framework Based on Reference Data with Superordinate Accuracy for the Quality Analysis of Terrestrial Laser Scanning-Based Multi-Sensor-Systems. In: Sensors 2017, 17(8), 1886, DOI: 10.3390/s17081886.
- Thurner, C. und Wunderlich, T. (2015) Verformungsgerechtes Aufmaß in einem BIM. In: Tagungsband DVW- Seminar, TLS2015.
- VALERO, E. UND BOSCHÈ, F. (2016) Automatic Surface Flatness Control using Terrestrial Laser Scanning Data and the 2D Continuous Wavelet Transformation. In: 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC 2016), Centre of Excellence for Sustainable Building Design, Heriot- Watt University, UK.
- WEIßENFELS, G., KLING, W., MEIBNER, B., REHM, R., SCHNEIDER, M., SEUL, J., ROHR-SUCHALLA, K., VOGEL, O., WESTPHAL, D. (2019a): Wann liegt überhaupt ein Mangel vor? Homepage von conjus GmbH. http://www.baurecht-ratgeber.de/baurecht/gewaehr/content_01.html (17.09.19).
- WEIßENFELS, G., KLING, W., MEIBNER, B., REHM, R., SCHNEIDER, M., SEUL, J., ROHR-SUCHALLA, K., VOGEL, O., WESTPHAL, D. (2019b): Mangel. Homepage von conjus GmbH. http://www.baurecht-ratgeber.de/baurecht/gewaehr/content_05_01.html#11 (17.09.19).
- WUNDERLICH, T.; WASMEIER, P.; OHLMANN-LAUBER, J.; SCHÄFER, T.; REIDL, F. (2013): Objektivierung von Spezifikationen Terrestrischer Laserscanner – Ein Beitrag des Geodätischen Prüflabors der Technischen Universität München. In: Blaue Reihe des Lehrstuhls für Geodäsie, Technische Universität München, Heft 20, 02/2013.