

Georeferenzierung – Warum die Erde manchmal eine Scheibe ist

Enrico Romanschek, M.Eng.

Prof. Dr.-Ing. Christian Clemen

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden
Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden
enrico.romanschek@htw-dresden.de
christian.clemen@htw-dresden.de

Der Beitrag zeigt, dass die sogenannte „Low Distortion Projection“ (LDP) eine wichtige Rolle bei der Integration von Vermessung und GIS in BIM-Projekten spielt. Als konkretes Beispiel wird von der Einführung lokaler Koordinatenreferenzsysteme für die Planung von Personenbahnhöfen bei der DB Station & Service berichtet.

Die dreidimensionale Planung und Modellkoordination von Teil- und Fachmodellen ist neben dem Informationsmanagement das wesentliche Moment des Building Information Modeling (BIM). Die dreidimensionale Vermessung des vorhandenen Baubestandes bildet die Grundlage der dreidimensionalen Modellierung. Allerdings arbeitet die in der BIM-Methode eingesetzten 3D-Autoren- und Koordinationssoftware meistens nicht mit geodätischen Koordinaten, sondern mit „normalen“ kartesischen Koordinatensystemen, oder – überspitzt formuliert: „BIM denkt, die Erde sei eine Scheibe“. Die systematischen Abweichungen bis zu 100 cm/1 km bei UTM-Koordinaten entstehen derzeit, weil 3D-Planungssoftware die Erdkrümmung nicht berücksichtigt.

Bei kleinräumigen Projekten, zum Beispiel bei einem Brückenbauwerk ist es sinnvoll lokale, dreidimensionale Koordinatensysteme zu verwenden. Dadurch werden die geodätischen Anforderungen mit der fachlichen Sicht der Architektur und des Bauingenieurwesens sowie den mathematischen Anforderungen der Bauinformatik und CAD in Einklang gebracht. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Volumenkörpermodellierung der CAD/BIM-Software zukünftig die gekrümmten geodätischen Koordinaten, wie die Koordinaten Bezugssysteme im ETRS89/UTM, mathematisch korrekt verwenden. Also müssen die geodätischen Koordinaten so umgeformt werden, dass die systematische Abweichung zwischen 3D-Planung und Vermessung durch die optimale Definition eines Koordinaten Bezugssystems minimiert wird.

1 Einleitung und Problemstellung

In der Praxis ergeben sich keine Schwierigkeiten bei der Georeferenzierung, solange die Gewerke in ihren eigenen Koordinatensystemen arbeiten. Geodäten sind versiert im Umgang mit raumbezogenen Koordinatenreferenzsystemen, sei es im Liegenschaftskataster, in der Landesvermessung oder in der Ingenieurgeodäsie. Architekten und Bauingenieure können problemlos dreidimensionale Berechnungen in lokalen Bauwerkskoordinatensystemen durchführen. Die Probleme der Georeferenzierung treten auf pragmatischer Ebene hervor, insbesondere wenn Daten zwischen diesen Fachbereichen ausgetauscht werden. Im ungünstigsten Fall erfolgt dieser Austausch ohne Kenntnis der spezifischen Anforderungen und mathematischen Methoden. Im besten Szenario erfolgt der Austausch jedoch mit umfassendem Verständnis für alle Transformationsparameter auf mathematischer, pragmatischer und Datenaustauschebene. Im Anschluss werden praxisorientierte Lösungsvorschläge für verschiedene Anwendungsfälle vorgestellt.

1.1 Relevanz und Anwendungsfälle

Die Georeferenzierung ist eine wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche BIM/GIS-Interoperabilität in allen Phasen des Lebenszyklus eines Gebäudes. Für die Modelle der gebauten Verkehrsinfrastruktur ist die Georeferenzierung unabdingbar – und zwar in allen Lebenszyklusphasen:

In der Entwurfs- und Planungsphase ist die gemeinsame Visualisierung von Gebäudemodellen und zugehörigen Geodaten von entscheidender Bedeutung. In einer „BIM to GIS“-Konvertierung können Gebäudemodelle für die räumliche Analyse verwendet werden, wie z. B. für Baugenehmigungsverfahren, Verkehrssimulationen oder Umweltanalysen. In einem „GIS to BIM“-Szenario kann der nahe gelegene geografische Kontext für den Gebäudeentwurf (Ausrichtung auf Grundstücksgrenzen, Gelände und Boden oder Platzierung von Gebäudepolygonen) in einem BIM-Autorenwerkzeug verwendet werden.

Auch während der Bauphase ist eine Georeferenzierung erforderlich, z. B. für die Absteckung und Maschinenführung mit hohen Genauigkeitsanforderungen, die Bauüberwachung (z. B. mit georeferenzierten Punktwolken) und das Flächenmanagement auf der Baustelle (Lagerplatz). Darüber hinaus spielt die Georeferenzierung in der Betriebs- und Instandhaltungsphase von Gebäuden eine wichtige Rolle. Anwendungsfälle sind eine nahtlose Indoor-Outdoor-Navigation oder ein integriertes „Indoor- und Outdoor“-Asset Management. Für beide Aufgaben ist die Verwendung eines gemeinsamen Koordinatensystems erforderlich. Bei der Indoor-Outdoor-Navigation wird das gemeinsame System für die korrekte Handhabung der Positionierungsgeräte während der Navigation benötigt, während beim Facility Management alle Objekte einer Anlage korrekt verortet (georeferenziert) werden müssen.

Mit Koordinaten werden Punkte im Raum beschrieben. Ein Koordinatensystem beschreibt die mathematischen Regeln, wie die Koordinaten den Punkten zugewiesen werden. Ein Koordinatenreferenzsystem ist darüber hinaus fest mit einem realen Objekt (z. B. dem Erdkörper oder Bauwerk) verbunden. Die Festlegung der Verbindung von Erdkörper und Koordinatenreferenzsystem nennt man Datum.

In BIM-Projekten müssen Vermessungs- und Geodaten mit oft unterschiedlichen Koordinatenreferenzsystemen gemeinsam genutzt werden. Amtliche Basisdaten, Geofachdaten und topografische Vermessungen liegen typischerweise in einem

- überregionalen,
- verzerrungsbehafteten, weil
- projizierten (= nach Lage und Höhe getrennten) und
- geodätischen (= erdbezogenen) Koordinatenreferenzsystem

vor. 3D-Bauwerksmodelle werden im Hochbau hingegen fast immer in einem

- lokalen,
- verzerrungsfreien, weil
- kartesischen und
- objektbezogenen (= bauwerksbezogenen) Koordinatenreferenzsystem

erstellt. Wird das objektbezogene Koordinatenreferenzsystem mittels geometrischer Transformation zum übergeordneten geodätischen Koordinatenreferenzsystem in Bezug gesetzt, spricht man von Georeferenzierung. Bei einer solchen Transformation können systematische Abweichungen entstehen. Das Ausmaß dieser Abweichungen hängt von folgenden Faktoren ab:

- dem gewählten Koordinatenreferenzsystem,
- der Längen- und Höhenausdehnung des Bauwerks sowie
- der Lage und Höhe (NN/NHN-Höhe) des BIM-Projekts.

Je nach Genauigkeitsanforderungen und Anwendungsfall muss beurteilt werden, ob die resultierenden Abweichungen vernachlässigt werden können oder nicht. Aus diesem Grund müssen bereits zu Beginn des Bauvorhabens neben der Wahl des Projektkoordinatensystems Überlegungen zur Transformation ins übergeordnete Koordinatenreferenzsystem – also zur Georeferenzierung – angestellt werden.

1.2 Stand der Forschung und Technik

Mittels Georeferenzierung erhalten Modellkoordinaten einen Erdbezug. Die Koordinaten beziehen sich also nicht auf „irgendein“ Koordinatensystem, sondern sind einem erdfesten geodätischen Datum zugeordnet. Der GIS-Standard zur Georeferenzierung ist DIN EN ISO 19111 (DIN, 2019). ISO 19111 spezifiziert alle wesentlichen Konzepte und Begriffe für geodätische, vertikale oder lokale Koordinatenreferenzsysteme, unterschiedliche Möglichkeiten, ein geodätisches Datum festzulegen sowie den Umgang mit kartesischen, ellipsoidischen, polaren, linearen und anderen Koordinatensystemen. Beim Übergang zwischen verschiedenen Koordinatenreferenzsystemen unterscheidet ISO 19111 zwischen dem Begriff der „Datumstransformation“ (Übergang von einem Datum zu einem anderen) und der „Koordinatenumformung“ (unter Beibehaltung des Datums). Entscheidend für die praktische Arbeit ist, dass geodätische Koordinatenreferenzsysteme in der Örtlichkeit zum Beispiel mit vermarkten Vermessungspunkten physikalisch realisiert werden können. Für die standardisierte und computerinterpretierbare Darstellung als „well known text“ (WKT) von Koordinatenreferenzsystemen wird der Standard ISO 19162 (ISO, 2019) von GIS Software verwendet. Eine umfassende Beschreibung sämtlicher, weltweit genutzter Koordinatenreferenzsysteme bietet das Kompendium „Geomatics Guidance Note, Coordinate Conversions and Transformations including Formulas“ (International Association of Oil & Gas Producers, 2019), das als Referenzwerk, zum Beispiel für die Softwareentwicklung, sehr geeignet ist. Diese gut entwickelten Standards müssen als Leitlinie für alle zukünftigen Entwicklungen herangezogen werden, wenn es um die Georeferenzierung von BIM-Modellen geht.

Neben den Standards wird das Thema „Georeferenzierung“ in zahlreichen berufspraktischen und wissenschaftlichen Publikationen diskutiert, vor allem dann, wenn ein Infrastrukturdatenmanagement mit BIM und GIS durchgeführt werden soll. Einen Überblick über die umfassende Literatur von BIM und Georeferenzierung bietet z. B. das Kapitel „Georeferenzierung“ von Clemen et al., 2022 im „Leitfaden Geodäsie und BIM“ (DVW e.V.; Runder Tisch GIS e.V., 2022).

Das Grundproblem ist, dass die BIM-Modellierungssoftware und Kollaborationsplattformen ausschließlich mit rechtwinkligen, kartesischen Koordinatensystemen arbeiten (Jaud et al., 2022). Die Erdkrümmung bleibt in diesen Softwaretypen und den dazugehörigen Austauschformaten unberücksichtigt. Aufbauend auf diesen geodätischen Grundlagen konstatieren Jaud et al., 2020 ebenfalls, dass die in der Ingenieurgeodäsie bekannten Methoden erhebliche Auswirkungen auf die Arbeitsabläufe des BIM haben, insbesondere wenn Koordinatenreferenzsysteme für langgestreckte Anlagen im Tief- und Verkehrswegebau angewendet werden. Das Grundproblem ist die konzeptuelle Diskrepanz zwischen

- dem kartesischen, dreidimensionalen Koordinatensystem des Bauwerksmodells (CAD/BIM) und
- den aus projizierter Lage und Normalhöhe zusammengesetzten Koordinatenreferenzsystemen der Geodäsie im GIS.

Jaud et al., 2020 zeigen mit beispielhaften Rechnungen, dass sich diese Diskrepanz auch auf aus der Geometrie abgeleitete Größen wie Längen und Volumina auswirkt. Ziel der Ansätze ist es stets, ein geodätisches Koordinatenreferenzsystem zu schaffen, das sowohl in andere Koordinatenreferenzsysteme transformiert werden kann als auch die systematischen Abweichungen zwischen „gekrümmter Erde“ und „flat-earth“ BIM minimiert.

In der wissenschaftlichen und technischen Literatur finden sich zahlreiche Verfahren für lokale KRS, die alle das Ziel haben, die Verzerrungen aufgrund der Erdkrümmung lokal zu minimieren. Dennis (2015) zeigt, wie sich im Kontext von Low Distortion Map Projections unterschiedliche Projektionstypen auswirken. Andere Autoren, z. B. (Baselga, 2021), entwickeln komplexe Verfahren für Gebiete großer Höhe, indem sie die Ellipsoiddimension (a , b) für lokale Messungen anpassen. Einen Überblick über die unterschiedlichen Konzepte der Ellipsoidanpassung geben Rollins und Meyer (2019). Wichtige Argumente für die Berücksichtigung der Höhe bei der KRS-Konzeption beschreiben die älteren Untersuchungen zur erforderlichen Höhengenaueigkeit bei der Bestimmung des Maßstabfaktors k_0 von Burkholder (2004).

Ein praktischer Ansatz wird z. B. beim Bau des Brenner Basistunnels (BBT) gewählt (Windischer et al., 2019). Der Mittelmeridian der Kartenprojektion (Transversal Mercator) wird so angepasst, dass das neue Koordinatenreferenzsystem „BBT_TM-WGS84“ im Projektgebiet keinen relevanten Maßstab aufweist und die Koordinaten deswegen direkt – auch in BIM-Software – verwendet werden können.

Der Ansatz, die Transformationsparameter der Projektion BIM spezifisch anzupassen, wurde in Deutschland zuerst für die Verkehrsstation Hbf Hannover umgesetzt (Manthe; Clemen, 2015). Diese Ansätze bilden die Grundlage für die Low-Distortion Projektion, wie sie in Clemen; Romanschek; Fleischer, 2023 und Abschnitt 3 “Low Distortion Projection – Beispiel DB Station & Service“ beschrieben wird. Den praktischen Einsatz lokaler Projektionen bei BIM-Projekten für Wasserwege beschreibt Heuer (2022).

Eines der derzeit größten Probleme im BIM-Bereich liegt im Schema des IFC-Standards (DIN EN ISO 16739-1). Der IFC-Standard ist bezüglich der Georeferenzierung nicht eindeutig. Die vielen Varianten und Ausprägungen der Georeferenzierung erschweren den Datenaustausch von Bauwerksmodellen zwischen BIM und GIS erheblich. Die LoGeoRef-Klassifikation der „Level of Georeferencing“ (Clemen; Görne, 2019), die auch im ISO SO/TR 23262:2021 „GIS (geospatial)/BIM interoperability“ ausgewiesen ist, spezifiziert fünf mögliche Ebenen (LoGeoRef: 10, 20, 30, 40 und 50) in einer IFC-Datei. (DIN, 2021) Je höher der Level, desto besser ist die Georeferenzierung konzeptionell modelliert. Die Level beziehen sich nicht auf die Qualität (Richtigkeit, Genauigkeit) der Transformationsparameter, sondern nur auf die verwendeten IFC-Konzepte.



Bild 1: LoGeoRef – Die einfache Metrik für die IFC-Konzepte der Georeferenzierung kann bei der Informationsbestellung verwendet werden, um die Teil- und Fachmodelle von Bauwerken im Infrastrukturdatenmanagement zu koordinieren

Tabelle 1: Beschreibung und Bemerkungen zu den LoGeoRef nach Clemen; Görne (2019)

LoGeoRef	Beschreibung	Bemerkung
0	Keine Georeferenzierung	In der LoGeoRef Metrik muss der Informationsbedarf „keine Georeferenzierung“ explizit angegeben werden
10	Einfache Referenzierung über Adressangabe im Grundstück (IfcSite) und/oder Bauwerk (IfcBuilding)	Zusätzliche Information, nicht ausreichend für Georeferenzierung
20	Einfache Punktreferenzierung über geografische Koordinaten des Grundstückes (IfcSite)	Zusätzliches Metadatum, nicht ausreichend für Georeferenzierung
30	Definition eines Koordinatensystems für das Grundstück (IfcSite) oder alternativ Bauwerk (IfcBuilding) ohne relativen Bezug zum anderen („höherrangigerem“) System. Level 30 ist die aktuelle Standardausgabe von BIM-Autorensoftware.	Ausreichend für Georeferenzierung, aber nicht mit LoGeoRef 40 bzw. 50 mischen!
40	Definition eines Projektkoordinatensystems (Attribut: WorldCoordinateSystem) und Angabe von True North (als Richtungsvektor von geografisch Nord oder Gitternord im lokalen Koordinatensystem).	Ausreichend für Georeferenzierung, aber nicht mit LoGeoRef 30 bzw. 50 mischen!
50	Angabe von Offset und horizontaler Rotation für Koordinatenumrechnungen zw. Projekt-system und Koordinatenreferenzsystem (KRS). Das KRS kann z. B. über einen EPSG-Code definiert werden. Diese Variante ist nur im neuen IFC4-Standard möglich.	Standard für Georeferenzierung, aber nicht mit LoGeoRef 30 bzw. 40 mischen!
60	Georeferenzierung über Passpunkte im Bauwerkssystem, Baulagenetz oder amtlichen Koordinatenreferenzsystem (KRS).	Zusätzlich, damit die Transformationsparameter rekonstruiert werden können.

Für das Informationsmanagement reicht es mit den derzeitigen Standards also nicht aus, die Georeferenzierung zu fordern. Zusätzlich muss das zu verwendende IFC-Konzept genannt werden. Sollen die Modelle nur mit einfachen Metadaten zur geografischen Koordinate (Länge, Breite, Höhe) annotiert werden, reicht Level 20. Für die exakte und einheitliche Koordination sollte LoGeoRef 50 (IfcMapConversion mit IfcProjectedCRS) verwendet werden. Level 30 und 40 sind nur notwendig, wenn eine Zielsoftware verwendet wird, die den IFC-Standard nicht vollumfänglich umsetzt.

Das Zusammenspiel von Geodäsie, Vermessung, Geoinformation und BIM ist neben der Georeferenzierung von vielen weiteren Faktoren abhängig. Einen umfassenden Überblick liefert hier zum Beispiel Herle et al. (2020) und Blankenbach et al. (2022).

1.3 Eine Phänomenologie der Georeferenzierung

Der Problembereich der Georeferenzierung für die BIM-Methode ist vielschichtig. Die unterschiedlichen Perspektiven sollen in der folgenden Phänomenologie nach Jaud et al. (2022) kurz in drei Ebenen zusammengefasst werden:

1. Die a priori Ebene ist unabhängig von BIM und umfasst die gegebenen mathematischen und geodätische Konzepte wie Koordinatensysteme und Umrechnungsmethoden, Referenzkörper (z. B. Ellipsoid), Kartographische Projektion, Geodätisches Datum und Koordinatentransformation, Koordinatenreferenzsysteme z. B. Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989 (ETRS89)/Universal Transverse Mercatorprojektion (UTM), Geometrisch-Physikalische Konzepte für Höhenmodelle (Geoid, ...)
2. Die Möglichkeits-Ebene umfasst die methodischen Voraussetzungen der Fachdomänen: OGC/ISO Standards (ISO 19111, ISO 19148, WKT ISO 19162, EPSG codes, ISO 19650), Schnittstellen für den Austausch zwischen BIM- und GIS-Software (IFC, GML, native Formate, ...) und Funktionalitäten der Software (Ist die Georeferenzierung in Software konzeptualisiert/richtig implementiert/parametrisierbar?)
3. Auf der pragmatischen Ebene geht es um die Umsetzung im konkreten Projekt. Dies umfasst eine „Geospatial Awareness“ im Projektmanagement, Fachwissen und gegenseitige Verständigung zwischen Beteiligten, Leitlinien für die Qualitätssicherung (Informationsaustauschanforderungen, checking tools, ...) sowie praktische Fertigkeiten der Bedienung von Software zur Modellierung und Kollaboration.

1.4 Ursachen für die Abweichungen – Die Erde ist keine Scheibe!

Zur „Planung und Umsetzung von Bauvorhaben mit amtlichen Lage- und Höhenkoordinaten“ beschreibt Heunecke (2017) die nötigen Reduktionsformeln für den Projektmaßstab m_p aufgrund der Kartenprojektion (UTM) und der Projekthöhe. Es werden auch die Änderungen Δm_p des Projektmaßstabes sowie die Nichtparallelität der Z-Richtungen problematisiert. Die Umsetzung dieser ingenieurgeodätischen Methoden in der verwendeten BIM-Software sollte möglichst frühzeitig, also auch schon in der Planungsphase, berücksichtigt werden, damit in der Bauphase, bei der Übertragung der Planung in die Örtlichkeit, keine systematischen Abweichungen entstehen.

Im Folgenden werden die Ursachen für eine Abweichung zwischen geodätischen Lagereferenzsystemen des Vermessungswesens und den dreidimensionalen Kartesischen Koordinaten des (lokalen) Bauwerksmodells zusammengefasst. Eine ausführliche Beschreibung findet sich zum Beispiel in Clemen et al. (2022) – noch grundlegender – in Witte et al. (2020).

Höhenkorrektion

Da die Lagekoordinaten auf dem Referenzellipsoid gerechnet werden, muss die Höhenlage der Baumaßnahme berücksichtigt werden. Aufgrund der Divergenz/Verjüngung der Lotlinien (ungefähr Richtung Erdmittelpunkt) nimmt die tatsächliche Distanz zwischen zwei Punkten mit der Höhe über dem Bezugsellipsoid zu. Gemessene horizontale Distanzen sind daher beim Übergang von der Realität in das (Lage-) Koordinatenreferenzsystem zu reduzieren. Die Höhenkorrektion beträgt bei NHN-Höhen bis 1000 m bis zu -16 cm/km beim Übergang von der Örtlichkeit in das Modell: $s_{\text{Hred}} = s_{\text{H}} \cdot (1 - h_{\text{ellipsoid}}/R)$ mit der Höhe h über dem Ellipsoid und dem mittleren Erdkrümmungsradius R (= ca. 6381 km). Bei der Berechnung der Höhenkorrektion muss zusätzlich die Höhenanomalie (Differenz zwischen Quasigeoid und Referenzellipsoid) berücksichtigt werden.

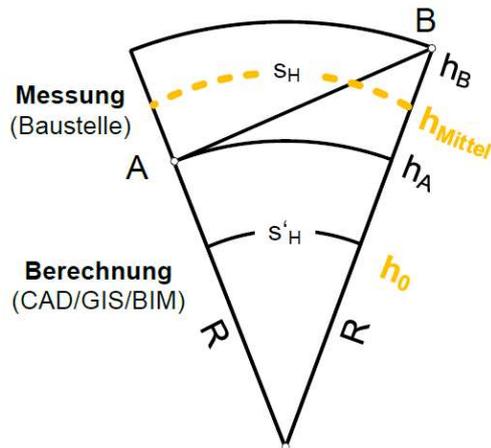


Bild 2: Auf der Baustelle gemessene Horizontalstrecken müssen aufgrund der Höhe in die Berechnungsebene projiziert werden (Clemen; Romanschek; Fleischer, 2023)

Abbildungskorrektion

Unter einer Abbildung versteht man in der Geodäsie die Umrechnung von geographischen bzw. ellipsoidischen Koordinaten (Φ , Λ) in kartesische Koordinaten (y , x). Gekrümmte Oberflächen, wie die des Rotationsellipsoids, lassen sich nicht ohne das Auftreten von Verzerrungen in ebene Flächen abbilden. Bei geodätischen Referenzsystemen auf dem Rotationsellipsoid mit konformen Abbildungen, wie Universalen Transversalen Mercator-Koordinaten (UTM) oder Gauß-Krüger-Koordinaten (GK), wird zugunsten der Winkel- auf die Streckentreue verzichtet. Diese aus der Projektion resultierenden Verzerrungen müssen als Korrekturen bei der Überführung von tatsächlichen (Natur)strecken in die jeweilige Abbildung angebracht werden.

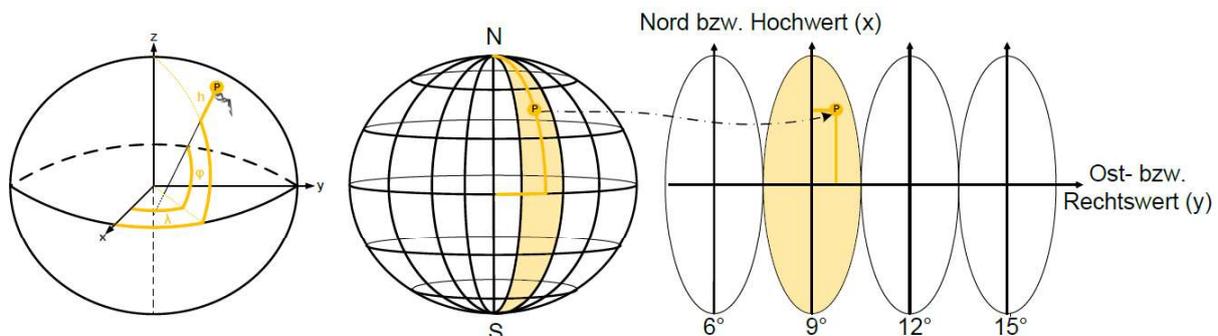


Bild 3: Die kartographische Abbildung beschreibt eine funktionale Abbildung der ellipsoidischen Koordinaten (links) auf die verebneten/projizierten Koordinaten, (z. B. UTM oder GK). Bei der Projektion ändert sich das geodätische Datum (z. B. ETRS89) nicht (Clemen; Romanschek; Fleischer, 2023)

Erdkrümmungskorrektion

Als Erdkrümmungskorrektion wird die Differenz der tatsächlich gebogenen Linie gleicher Höhe zur Länge der Linie in einer (Tangential-)Ebene angenommen. Bei Distanzen bis zu 10 km beträgt die Differenz jedoch nicht mehr als 1 mm und kann in der Baupraxis in der Regel vernachlässigt werden (Witte et al., 2020).

Gesamtreduktion

Die Gesamtreduktion setzt sich additiv aus allen Korrekturwerten zusammen:

- der Abbildungskorrektur aufgrund der Abbildung der gekrümmten Fläche in die Ebene
 - der Höhenkorrektur aufgrund der Divergenz der Lotlinien mit der Höhe und
 - der Erdkrümmungskorrektur (die in der Regel vernachlässigt werden kann),
- wobei sich die Korrekturen kumulieren oder teilweise gegeneinander aufheben können.

Ein Beispiel aus dem „Leitfaden Geodäsie und BIM“ (DVW e.V.; Runder Tisch GIS e.V., 2022) zeigt am höchsten Punkt Nordrhein-Westfalens, dem Langenberg, nahe des Mittelmeridians (ETRS89/UTM-Koordinaten: E = 32469200,000, N = 5680660,000 auf einer NHN-Höhe von 843 m), eine Abbildungsreduktion von -40 cm/km und eine Höhenreduktion von -14 cm/km, zusammen also eine resultierende Reduktion von -54 cm/km und damit einen Projektmaßstab von 0,999460 von der Örtlichkeit in das Koordinatenreferenzsystem ETRS89/UTM.

Diese Korrekturen müssen beim Übergang zwischen

- Realität und geodätischem Modell (Bestandsdokumentation, Absteckung) sowie
 - Geodätischem Modell/GIS und maßstabsfreiem CAD/BIM-Modell
- angebracht werden.

Allerdings bleibt die Transformation nicht auf den Maßstab der Lagekoordinaten beschränkt. Insbesondere müssen bei lokalen BIM-Projekten ein Einfügepunkt für die Translation (Verschiebung) und die Drehung (Rotation) festgelegt werden. Die Nordrichtung, also die Rotation zwischen Bauwerkskoordinatensystem und projizierten Koordinatenreferenzsystem bezieht sich auf das sogenannte „Gitternord“, was gegebenenfalls Abweichungen zur geographischen Nordrichtung (Meridiankonvergenz) nach sich zieht. Für große, langgestreckte Strukturen müssen zusätzlich umfassende geodätische Konzepte aufgrund der Erdkrümmung, gegebenenfalls auch Lotabweichung (Gravitationsrichtung) angewendet werden (Heunecke, 2017).

Die nach der BIM-Methode üblichen Transformationen (siehe Abschnitt 2 Lösungsvarianten für die Transformation) gelten nur für lokal begrenzte Bereiche von 100 m bis 5 km. Eine langgestreckte Anlage (Straße, Schiene, Wasserweg) muss gegebenenfalls in Teilabschnitte zerlegt werden. Dabei müssen Übergangszonen zwischen den Teilbereichen definiert werden. Dazu empfehlen Jaud et al. (2020) u. a. eine gleichmäßige, auf eine Übergangszone beschränkte, Approximation des Projektmaßstabs zwischen den räumlich getrennten Teilprojekten entlang der Trasse.

2 Lösungsvarianten für die Transformation

Zur Vereinfachung werden im Folgenden geodätische Koordinatenreferenzsysteme (KRS), die zwischen Lage und Höhe trennen „2D+1D“ genannt, geozentrisch-kartesische Koordinatensysteme werden mit „3D“ gekennzeichnet. 3D-topozentrische Systeme haben ihren Ursprung im Projektreferenzpunkt des lokal begrenzten BIM-Projektes.

Die wichtigsten Transformationsparameter sind:

- X_0 = Rechtswert/Ostwert des Projektbasispunktes im geodätischen KRS,
- Y_0 = Hochwert/Nordwert des Projektbasispunktes im geodätischen KRS,
- α = Nordrichtung, Rotation um Z-Achse,
- M_p = Projektmaßstab (Lage) aufgrund von Projektion und Projekthöhe,
- H = Geodätische Höhe des Projektbasispunktes.

Zu beachten ist weiter, ob sich der Satz der Transformationsparameter auf das gesamte BIM-Projekt (Quartier, Bauabschnitt, Werksgelände) oder nur auf ein einzelnes Bauwerk (Gebäude, Brücke, Straßenabschnitt) mit begrenzter Ausdehnung bezieht.

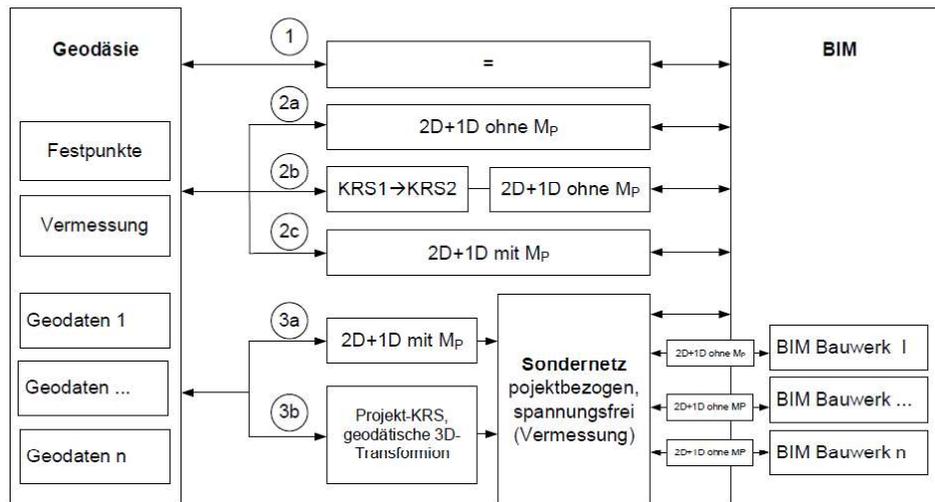


Bild 4: Übersicht zu den vorgestellten Varianten (V1, V2, V3) für pragmatische Ansätze zur Georeferenzierung von BIM-Modellen
(Clemen et al., 2022)

V1: Vermessung/Geodaten und BIM mit identischen Koordinatensystemen

Bei Variante 1 verwenden beide Domänen das identische Koordinatensystem. Dies passiert im Infrastrukturbereich, wenn die BIM-Planung z. B. nur in amtlichen, georeferenzierten Koordinatenreferenzsystemen (1a) durchgeführt wird. Oder, wie zum Beispiel in der Denkmalpflege, die Vermessung direkt im Bauwerkskoordinatensystem (1b) durchgeführt wird.

Weitere Geodaten können im BIM-Projekt nicht verwendet werden. Eine derzeit nur in Forschungsprojekten, z. B. (Wunderlich, 2021), untersuchte Variante wäre es, gemeinsam in einem geozentrischen, kartesischen 3D-Koordinatenreferenzsystem (1c) zu planen. Der Vorteil wäre eine maßstabsfreie Georeferenzierung, die sich allerdings durch die Nutzung eines deutlichen weniger intuitiv verwendbaren Koordinatensystems bzw. weniger anschaulichen Koordinatenwerten erkauft würde.

V2: Transformationsparameter (2D+1D) zwischen Vermessung/GIS und BIM

Die Varianten 2a, 2b und 2c beziehen sich jeweils auf die Transformation zwischen amtlichen Geodaten/Vermessung und einem Bauwerkskoordinatensystem. Die Transformationsparameter für die Lage des Projektbasispunktes (X_0 , Y_0) im Koordinatenreferenzsystem werden im BIM-Projekteinheitlich festgelegt und angewendet. Die Nordrichtung α , die in der Regel der Winkel zwischen geodätischem Gitternord und y-Achse des Bauwerkssystems ist, wird ebenfalls festgelegt. Es muss aber sichergestellt sein, dass alle beteiligten Softwaresysteme die Nord-Rotation richtig anbringen. BIM-Software setzt die Drehrichtung aufgrund der Orientierung (Links vs. Rechtssystem) und Drehrichtung (Uhrzeigersinn vs. gegen Uhrzeigersinn) teilweise falsch um. Problematisch ist die Auswirkung des Projektmaßstabs M_P , weil der Maßstab in „typischer“ Hochbau-BIM-Software bei der Transformation nicht angebracht wird. Es stellt sich also die Frage, wie groß diese Abweichungen zwischen Vermessung/Geodaten und BIM sind. Und ob diese noch tolerierbar sind. Diese Frage muss für jedes BIM-Projekt gesondert beantwortet werden, weil der Projektmaßstab M_P stark von der Art der Projektion (GK, UTM), der geografischen Lage des Bauwerks (Abstand vom Mittelmeridian) und der Geländehöhe abhängt.

V3: Doppelte Transformation zwischen GIS \rightarrow Vermessung/Sondernetz \rightarrow BIM

Hoch- und Ingenieurbauprojekte werden im Gegensatz zu Infrastrukturbauprojekten in BIM immer maßstabsfrei (1:1) und in einem ebenen, kartesischen Projektkoordinatensystem entworfen und geplant.

Um die maßstabsfreie BIM-Planung spannungsfrei in die Örtlichkeit zu übertragen, werden mit einer (ersten) Transformation gesonderte Baulagenetze (Sondernetze) mit einem projektbezogenen Koordinatensystem im Maßstab $M_P = 1$ angelegt. Der pragmatische Vorteil für BIM ist, dass die (zweite) Transformation zwischen Sondernetz und Bauwerkskoordinatensystem die Variante 2a, $f(X_0, Y_0, \alpha, H)$, also eine Transformationen ohne Maßstab angewendet werden kann. Zwischen der Vermessung im Sondernetz und BIM-Modell gibt es keine systematischen Abweichungen.

Die Bestimmung der (ersten) Transformationsparameter vom georeferenzierten System in das Sondernetz ist jedoch etwas komplizierter. Zunächst müssen die vorliegenden oder geodätisch neu bestimmten Festpunkte in der Örtlichkeit spannungsfrei vermessen und ausgeglichen werden. Für kleinere Projekte (< 1 km) kann es dann ausreichen, eine 2D-Helmert-Transformation (x_0, y_0, δ, m) für die Umrechnung zwischen (amtlichen) Lagekoordinaten und BIM-Projektkoordinaten anzusetzen. Dieses Vorgehen wird zum Beispiel von buildingSMART AUSTRALASIA (2020) vorgeschlagen. Diese Variante ist im Bild 4 unter 3a aufgeführt. Für größere (> 1 km) Projekte empfehlen wir Variante 3b. Hier müssen die vorliegenden oder geodätisch neu bestimmten Festpunkte zunächst in ein neues, georeferenziertes Koordinatenreferenzsystem (KRS) umgerechnet werden. Dieses KRS wird lokal und vorhabenbezogen angelegt. Dafür müssen festgelegt werden: Geodätisches Datum (z. B. ETRS89, DB_REF und Referenzellipsoid) und Projektion (Ursprung (Φ, Λ), Art der Projektion (z. B. Transversal Mercator, Maßstab wegen Höhe und Offsetwerte). Die Transformation von Geodaten in das Vermessungssystem kann durch Standard-Vermessungs- und GIS-Software durchgeführt werden, wenn die genannten Transformationsparameter vom amtlichen Landessystem (z. B. ETRS89/UTM) in das lokale geodätische Bezugssystem publiziert werden.

3 Low Distortion Projection (LDP) – Beispiel DB Station & Service

Im „Leitfaden Geodäsie und BIM“ erläutern Reifenhäuser und Wunderlich (2022) die spezifischen BIM-Anforderungen für die Verwendung des Koordinatenreferenzsystems DB_REF in der Eisenbahninfrastruktur. Die Autoren plädieren für einen „einheitlichen Ansatz, der die homogene und maßstabstreue Integration aller BIM-Modelle gewährleistet“. Sie betonen, dass die Trassierung gemäß kartographischer Abbildung erfolgen muss, selbst bei Anwendung der BIM-Methode, aufgrund der Anforderungen der Regelwerke. Im „3D-BIM“ für lokale Planungen, wie zum Beispiel Ingenieurbauwerke, kann die Trasse in eine 3D-Raumkurve umgewandelt werden. Dabei wird durch Passpunkte ein lokales, kartesisches Koordinatensystem erstellt, dessen Z-Achse die Lotrichtung approximiert.

Die barrierefreie Erneuerung von 5.400 Personenbahnhöfen wird seit dem 1.1.2017 durch Building Information Modeling (BIM) unterstützt. BIM fokussiert sich auf die dreidimensionale Planung und Modellkoordination. Allerdings arbeiten 3D-Softwarelösungen nicht mit geodätischen Koordinaten, was systematische Abweichungen verursacht. In lokalen Projekten, wie der Planung von Ingenieurbauwerken oder Personenbahnhöfen, ist die Verwendung kartesischer Koordinaten unerlässlich, da diese die Grundlage der Planungssoftware für Architekten, Bau-, Elektro- und Maschinenbauingenieure bilden. Die Lösung besteht darin, geodätische Koordinaten in ein optimiertes Koordinatenbezugssystem umzuwandeln. Dieses Verfahren wurde standardisiert und für alle 5.400 Verkehrsstationen implementiert, um systematische Abweichungen (siehe Abschnitt 1.4) zu minimieren und das DB_REF-Datum für den Trassenbezug zu nutzen. Dadurch wird eine präzise Nutzung von geometrischen Informationen ermöglicht, die Überführung in andere Koordinatensysteme erleichtert und das direkte Abstecken von Bauvorhaben aus dem Modell unterstützt.

Die Herausforderung besteht darin, die geodätische Perspektive für die qualifizierte Trassierung im Rahmen schneller Zugfahrten (DB_REF; GIS-Systeme) mit der kartesischen Per-

spektive der lokalen Bauwerksplanung (3D; CAD-Systeme) zu verbinden. Die Lösung liegt in der Umformung (nicht Transformation!) der geodätischen Koordinaten, um systematische Abweichungen zwischen 3D-Planung und Vermessung durch die optimale Definition eines Koordinatenbezugssystems (KRS) zu minimieren. Es wird pro Verkehrsanlage eine „Low-Distortion-Projection“ (LDP) eingefügt.

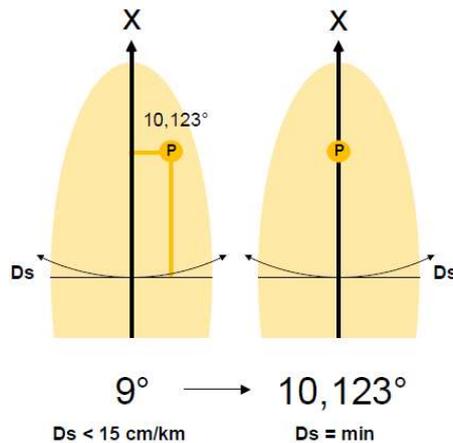


Bild 5: Statt der ganzzahligen GK-Mittelmeridiane (3°, 6°, 9° 12°, 5°) legt das VA-System die transversale Zylinderprojektion durch die ellipsoidische Koordinate der Verkehrsanlage (VA) (Clemen; Romanschek; Fleischer, 2023)

Durch dieses neue einheitliche und standardisierte Verfahren wurde für alle 5400 Verkehrsstationen ein lokales KRS erstellt und auf der Infoplattform als Datenbank zur Verfügung gestellt. Dieser Typ von KRS wird als lokales Koordinatensystem Personenbahnhöfe (kurz VA-System) bezeichnet. Die Umformung der lokalen VA-Systeme zum DB_REF ist einfach mit GIS- und CAD-Software umzusetzen und basiert auf gängigen IT-Standards. VA-System und DB_REF/GK unterscheiden sich nur wenig: Statt einer globalen Gauß-Krüger Abbildung mit 3°-Meridianstreifen findet beim VA-System pro Verkehrsstation eine lokal optimierte kartographische Projektion statt, wodurch die systematische Abweichung auf maximal 2 mm/1 km minimiert wird.

Das lokale Koordinatensystem Personenbahnhöfe nutzt als Grundlage das einheitliche geodätische Datum DB_REF, wodurch der Trassenbezug besonders gewährleistet ist. Die hohe Netzqualität (absolut 1 cm/relativ 5 mm) des DB_REF bleibt im Koordinatensystem Personenbahnhöfe erhalten.

Mit diesem neuen standardisierten Verfahren können geometrische Informationen auch in den Jahren nach der Planung lagerichtig weiterverwendet sowie in andere KRS überführt und integriert werden – das geodätische Datum bleibt unverändert und es werden im Gegensatz zur Helmert-Transformation über Passpunkte keine heuristischen Annahmen eingeführt. Die Parameter in der erstellten VA-System-Datenbank parametrieren eine automatisierte Umformung von DB_REF Koordinaten zum lokalen System und zurück. Die Parameter (Werte der VA-System-Datenbank) wurden unter folgenden Prämissen berechnet:

- Die Parameter beschreiben ein aus Lage und Höhe zusammengesetztes (engl. compound) 2D+1D Koordinatenreferenzsystem (KRS).
- Das geodätische Datum des DB_REF (Lagerung und Ellipsoiddimension) bleibt unverändert. Es findet keine geodätische Datumstransformation statt.
- Es wird lediglich die (kartographische) Projektion angepasst. Der Mittelmeridian λ_0 einer

transversalen Mercator-Projektion läuft durch die gegebenen geographischen Koordinaten der Verkehrsstation.

- Der Ursprung der Projektion ist durch Breiten- und Längengrad (φ_0, λ_0) definiert. Die lokalen VA-System Koordinaten erhalten einen Zuschlag in Ostrichtung $f_E = 5.000$ m und in Nordrichtung $f_N = 10.000$ m damit negative Koordinatenwerte im Maßnahmenbereich vermieden werden.
- Der Maßstab k_0 der Mercator-Projektion wird so optimiert, dass die Differenz zwischen gemessener Horizontalstrecke und aus Koordinaten gerechneter Strecke in der Projektionsebene lokal minimiert wird. Ausschließlicher Einflussfaktor für k_0 ist die Höhe des Projektgebietes. Die Geoidabweichung wird berücksichtigt.
- Die Höhen des VA-Systems sind identisch mit DB_REF2016.
- Für jedes VA-System wird ein Ordner erstellt, der die Parameter nach ISO 19162 (engl.: Well-known text representation of coordinate reference systems) in den syntaktischen Dialekten u. a. für SIMPLE, SFSQL, GDAL, ESRI, ProjJSON, GML sowie ein spezielles Autodesk xml Format enthält.

Mit diesen Prämissen wird das Ziel erreicht, die systematischen Abweichungen zwischen Vermessung und 3D-Software zu minimieren. Wenn die Vermessungsmodelle (Festpunkte, topografische Aufnahme, 3D-Punktwolke) im VA-System vorliegen, können diese direkt von 3D-BIM-Software verwendet werden. Die Erde darf – überspitzt gesagt – für BIM eine Scheibe bleiben.

Um systematische Abweichungen zwischen Vermessung und 3D-Modellierung zu minimieren, erfolgt die Umformung der Koordinaten DB_REF → VA-System zeitlich zwischen Netzverdichtung und anlassbezogener Vermessung im Maßnahmenbereich:

1. Verdichtung des DB_REF Festpunktfeldes. Die Netzverdichtung erfolgt nach allen Qualitätsvorgaben und Verfahrensvorschriften der DB Netz, die Punkte werden in der Örtlichkeit vermarktet und dokumentiert.
2. Umformung DB_REF → VA-System. Die Festpunkte werden automatisiert in das VA-System der Verkehrsstation überführt. Hierfür stellt die VA-System Datenbank Parameter für alle Verkehrsstationen der DB Station und Service bereit.
3. Projektbezogene Verdichtung des Festpunktfeldes. Die Netzverdichtung erfolgt nach ingenieurgeodätischen Erfordernissen im maßstabsfreien VA-System, die Punkte werden in der Örtlichkeit vermarktet und dokumentiert.
4. Messen der Objektpunkte und 3D-Laserscanning. Die Punktwolken und Koordinaten der Objektpunkte werden im VA-System gemessen. Die Punkte beschreiben das Bauwerk und bilden die Grundlage für die Modellierung in CAD, GIS und BIM. Es entstehen keine systematischen Differenzen zwischen Vermessung und Modellierung in 3D-Software. Der Einfluss der Erdkrümmung auf die Lagekoordinaten kann aufgrund der Umformung vernachlässigt werden.
5. Maßstabsfreie und homogene 3D-Modellierung. Alle Maße und Mengen können ohne Korrekturfaktor aus dem 3D-Modell abgeleitet werden.

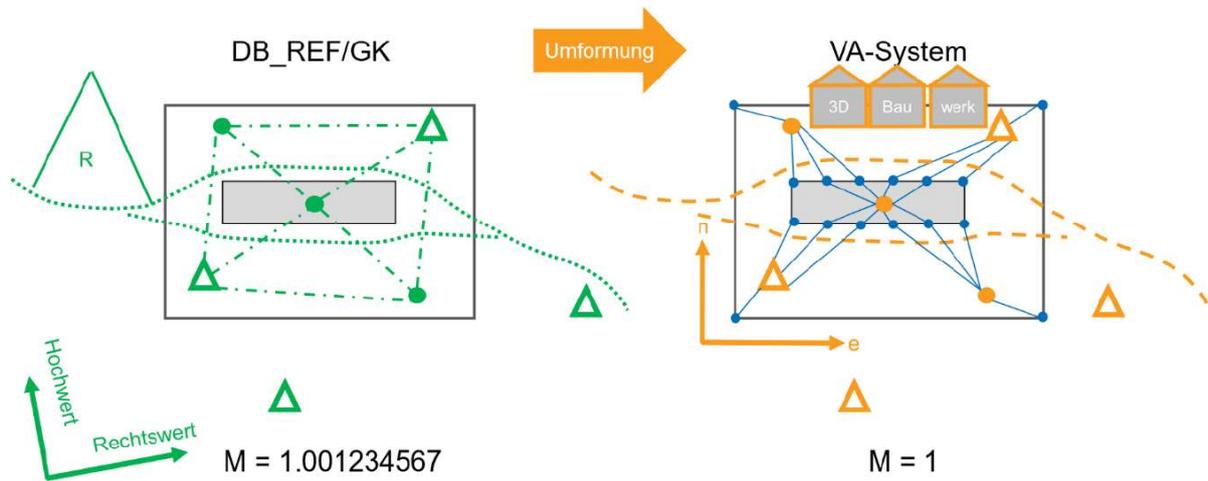


Bild 6: Die übergeordnete Netzverdichtung und Trassierung finden im DB_REF/GK statt. Die lokale Verdichtung, Objektvermessung und Modellierung im VA-System

Der komplette Werkzeugkasten für die Umsetzung des VA-Systems in Projekten, inklusive der Datenbank (den Definitionsdateien für 5.400 Verkehrsstationen) findet sich auf der Informationsplattform Bau, Anlagentechnik, IT/TK der Personenbahnhöfe frei zugänglich im Internet. Die VA-System Datenbank führt für jede Bahnstationsnummer einen eigenen Ordner, der die kleinen Definitionsdateien enthält. Es werden neben den ISO Standards ISO 19162:2019 auch WKT-Dialekte für ESRI und ein spezielles Format für Autodesk und Bentley Produkte bereitgestellt. Mit wenigen Klicks oder Standardbefehlen im GIS- oder CAD-System wird die passende WKT-Datei eingebunden. Die Software ist dann in der Lage das VA-System gemeinsam mit DB_REF/GK bzw. den Koordinatenbezugssystemen der Landesvermessung zu verwenden.

4 Fazit

Die dreidimensionalen BIM-Modelle schaffen die Voraussetzung dafür erst digital zu planen und dann real zu bauen. Mit dem beispielhaft vorgestellten VA-System „passen“ nun Geodaten, Vermessung und Modell geometrisch im Koordinationsmodell exakt zueinander. Das VA-System ist die massenhafte, praktische Umsetzung einer „Low Distortion Projection“ (LDP). Durch die standardisierte Anwendung der Koordinatenumformung und die einfache Bereitstellung der Datenbank wird die digitale Planung einfacher und schneller. Das VA-System ermöglicht, dass künftig Punkte und Achsen direkt aus dem Ausführungsmodell auf der Baustelle abgesteckt werden können. Die derzeit genutzten Umrechnungen mit Einfügepunkt bzw. Offset können zukünftig entfallen. Weil die Absteckung zukünftig modellbasiert ist, sind keine gesonderten Absteckungspläne mehr erforderlich. Die Methode kann problemlos von Personenbahnhöfen auf andere lokal begrenzte Bauwerke wie Brücken und Tunnel übertragen und auch von anderen Verkehrsträgern angewendet werden.

Damit BIM geometrisch genau funktioniert, darf die Erde lokal eine Scheibe bleiben, aber nur, wenn die Geodäsie die Voraussetzungen dafür schafft!

Bekanntmachung

Einzelne Textfragmente dieses Beitrages wurden von den Autoren in den Publikationen (Clemen et al., 2022), (Clemen; Romanschek; Fleischer, 2023) und (Clemen; Gruner; Pfeifer, 2023) bereits veröffentlicht und basieren auf der fachlichen Zusammenarbeit mit den jeweiligen Ko-Autoren.

Literaturverzeichnis

- Baselga, S. (2021): Two Conformal Projections for Constant-Height Surface to Plane Mapping. *Journal of Surveying Engineering*, 147(2), 6020004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000345](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000345)
- Blankenbach, J.; Clemen, C.; Becker, R. (2022): Grundlagen und Informationsmanagement der BIM-Methode. In DVW e.V. & Runder Tisch GIS e.V. (Hrsg.), *Leitfaden Geodäsie und BIM: Version 3.1* (S. 17–50)
- buildingSMART AUSTRALASIA (Hrsg.). (2020): Model Setup IDM -“How to Setup Geo-referencing in a Building or Linear Infrastructure Model“: Appendix B: Geo-referencing BIM. buildingSMART. <https://www.buildingsmartusa.org/wp-content/uploads/2020/02/Appendix-B-Geo-referencing-BIM-v2.0.pdf>
- Burkholder, E. F. (2004): Accuracy of Elevation Reduction Factor. *Journal of Surveying Engineering*, 130(3), 134–137. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2004\)130:3\(134\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2004)130:3(134))
- Clemen, C.; Becker, R.; Kaden, R.; Blankenbach, J. (2022): Georeferenzierung. In DVW e.V. & Runder Tisch GIS e.V. (Hrsg.), *Leitfaden Geodäsie und BIM: Version 3.1* (S. 50–65). <https://dvw.de/BIM-Leitfaden.pdf>
- Clemen, C.; Görne, H. (2019): Level of Georeferencing (LoGeoRef) using IFC for BIM. https://jgcc.geoprevi.ro/docs/2019/10/jgcc_2019_no10_3.pdf
- Clemen, C.; Gruner, F.; Pfeifer, J. (2023). *Infrastrukturdatenhaltung mit BIM und GIS*. <https://doi.org/10.48755/dzsf.230015.01>
- Clemen, C.; Romanschek, E.; Fleischer, A. (2023): Georeferenzierung von 3D-Modellen mit dem VA-System für Personenbahnhöfe: Das neue „Koordinatensystem Personenbahnhöfe“ minimiert systematische Abweichungen zwischen Vermessung und 3D-Planung, S. 56–59
- Dennis, M. L. (2015): *Ground Truth: Design and Documentation of Low Distortion Projections for Surveying and GIS*
- DIN (2019): *DIN EN ISO 19111 Geoinformation-Koordinatenreferenzsysteme (DIN EN ISO 19111)*. Beuth Verlag GmbH
- DIN (2021): *DIN ISO/TR 23262 GIS (Geospatial) / BIM-Interoperabilität (ISO/TR 23262:2021) (Technischer Report DIN ISO/TR 23262)*. Beuth Verlag GmbH
- DVW e.V. & Runder Tisch GIS e.V. (Hrsg.). (2022): *Leitfaden Geodäsie und BIM: Version 3.1*. <https://dvw.de/BIM-Leitfaden.pdf>
- Herle, S.; Becker, R.; Wollenberg, R.; Blankenbach, J. (2020): GIM and BIM. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88(1), 33–42. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00090-4>
- Heuer, D. (2022): Arbeiten im „lokalen CRS“. In DVW e.V. & Runder Tisch GIS e.V. (Hrsg.), *Leitfaden Geodäsie und BIM: Version 3.1*. Handlungsempfehlung
- Heunecke, O. (2017): Planung und Umsetzung von Bauvorhaben mit amtlichen Lage- und Höhenkoordinaten. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* (3/2017), S. 180–187. <https://doi.org/10.12902/zfv-0160-2017>
- International Association of Oil & Gas Producers (Hrsg.). (2019): *Coordinate Conversions and Transformations including Formulas: Geomatics Guidance Note Number 7, part 2*. <https://www.iogp.org/bookstore/product/coordinate-conversions-and-transformation-including-formulas/>
- ISO (2019): *ISO 19162 Geoinformation – WKT-Darstellung von Koordinatenreferenzsystemen (ISO 19162)*, International Standard Organization
- Jaud, Š.; Clemen, C.; Muhič, S.; Borrmann, A. (2022): Georeferencing in IFC: Meeting the requirements of infrastructure and building industries. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-4/W2-2022, 145–152. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W2-2022-145-2022>

- Jaud, Š.; Donaubaer, A.; Heunecke, O.; Borrmann, A. (2020): Georeferencing in the context of building information modelling. *Automation in Construction*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103211>
- Manthe, C.; Clemen, C. (2015): TLS für das Building Information Modeling (BIM) – Das BIM-Pilotprojekt Erneuerung Hbf Hannover: Beiträge zum 147, DVW-Seminar am 7. und 8. Dezember 2015 in Fulda, *Terrestrisches Laserscanning 2015 (TLS 2015)*(81)
- Reifenhäuser, M.; Wunderlich, T. (2022): Geodätischer Raumbezug der Eisenbahn-Infrastruktur. In DVW e.V. & Runder Tisch GIS e.V. (Hrsg.), *Leitfaden Geodäsie und BIM: Version 3.1*, S. 179–181
- Rollins, C. M.; Meyer, T. H. (2019): Four Methods for Low-Distortion Projections. *Journal of Surveying Engineering*, 145(4), 4019017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000295](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000295)
- Windischer, G.; Hofmann, M.; Glatzl, R.; Bergmeister, K. (2019): Modellierung von Tunnelbauwerken in BIM-Systemen unter Berücksichtigung besonderer Referenzsysteme für den länderübergreifenden Lage- und Höhenbezug. *allgemeine vermessungs-nachrichten (avn)*(6-7)
- Witte, B.; Sparla, P.; Blankenbach, J. (2020): *Vermessungskunde für das Bauwesen mit Grundlagen des Building Information Modeling (BIM) und der Statistik* (9., neu bearbeitete und erweiterte Auflage). Wichmann
- Wunderlich, T. (2021): Misalignment–Can 3D BIM Override Professional Setting-out According to Plane and Height? *Contributions to International Conferences on Engineering Surveying*, 3–12. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51953-7_1