

# Planung und Umsetzung von Bauvorhaben mit amtlichen Lage- und Höhenkoordinaten

Otto Heunecke

## Zusammenfassung

Die CAD- bzw. BIM-gestützte Planung von Bauwerken, z. B. der Bau von Brücken, erfolgt regelmäßig in lokalen kartesischen Koordinaten mit der Meterdefinition als einheitlichem Maßstab. Demgegenüber liegen die amtlichen Geodaten in Deutschland hinsichtlich der Lage in dem Koordinatenreferenzsystem ETRS89/UTM und bezüglich der Gebrauchshöhen als Normalhöhen im DHHN2016 vor. Bei dem Einbezug von amtlichen Geobasisdaten in die Planung von Bauvorhaben und der Umsetzung einer Planung in die Örtlichkeit führt dies auf zu beachtende Umstände, die in der Praxis nicht ohne weiteres vernachlässigt werden dürfen.

## Summary

*CAD or BIM supported planning of buildings such as the construction of bridges is regularly accomplished in local Cartesian coordinates based on the definition of the meter as unitary scale. In contrast, official geo data in Germany are defined in the coordinate reference frame ETRS89/UTM concerning plane projection and according elevation the normal heights with respect to DHHN2016. Using official geo base data in the planning of building projects as well as execution on site this lead to circumstances not to neglect readily in praxis.*

**Schlüsselwörter:** Bauwerksmodellierung, BIM, Höhenreduktion, Quasigeoidhöhen, UTM-Abbildungsreduktion, Trassierung

## 1 Einleitung

Mit dem Ziel einer effizienten Geodatennutzung hat die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) die Homogenisierung der Lagebezugssysteme durch die Einführung des ETRS89 mit der UTM-Abbildung sowie die Einführung von Gebrauchshöhen als Normalhöhen mit Bezug zum Pegel in Amsterdam bereits in den 1990er Jahren beschlossen (z. B. Kreitlow et al. 2010). Dies bedeutet u. a., dass das internationale Meter nunmehr einheitlich den Maßstab im amtlichen geodätischen Raumbezug bildet und die bei der Landesaufnahme historisch gewachsenen Abweichungen von der Meterdefinition beim Bezugssystemwechsel bereinigt wurden. Der Bezugssystemwechsel ist in fast allen Bundesländern zwischenzeitlich abgeschlossen bzw. steht unmittelbar bevor.

Die amtlichen Geobasisdaten AFIS, ALKIS und ATKIS, die zugleich den Bezugsrahmen für andere Datenbestände der GDI-DE respektive von INSPIRE vorgeben, liegen durch diese AdV-Beschlüsse bezüglich der Lage bundesweit in dem Koordinatenreferenzsystem ETRS89/UTM

bezogen auf das GRS80 und bezüglich der Höhe als Normalhöhen im DHHN2016 vor. Was die Lage betrifft, führt dies dazu, dass Strecken und in der Folge auch Flächen gegenüber ihren entsprechenden Werten in der Örtlichkeit in den meisten Regionen Deutschlands stärker maßstäblich verzerrt werden, als dies bisher bei den auf das Bessel-Ellipsoid bezogenen Gauß-Krüger-Koordinaten der Fall war.

Bezüglich der Höhen ist zu beachten, dass das als Referenzellipsoid eingeführte global definierte GRS80 das Quasigeoid in Deutschland schlechter approximiert, als es das regional definierte Bessel-Ellipsoid von 1841 getan hat, und in der Folge Geoidhöhen und Neigungen des Quasigeoids auch bei Gebieten mit nur kleiner Ausdehnung zu nicht ohne weiteres zu vernachlässigenden Effekten gegenüber ellipsoidischen Höhenunterschieden führen, insbesondere wenn satellitengestützt Höhen übertragen werden sollen. UTM-Koordinaten  $E, N$  und senkrecht senkrecht auf der Abbildungsebene abgetragene Normalhöhen  $H$  bilden als kotierte Projektion ein Linkssystem, wobei durch die Konvergenz der Lotlinien bezüglich der ellipsoidischen Koordinaten  $B, L$  zunächst ein krummlinig-orthogonales Koordinatensystem vorliegt.

CAD-gestützte Planungen von Bauwerken, z. B. der Bau von Brücken, erfolgen regelmäßig in lokalen kartesischen  $X, Y, Z$ -Rechtssystemen mit einem einheitlichen Maßstab, welcher per definitionem der internationalen Meterfestlegung entspricht. BIM (Building Information Modeling) umschreibt als Methode die durchgängige Digitalisierung aller planungs- und realisierungsrelevanten Bauwerksinformationen in einem virtuellen Bauwerksmodell (Borrmann et al. 2015). Auch hier wird standardmäßig mit lokalen kartesischen Koordinaten gearbeitet. BIM erweitert das zeichnungs- und layerorientierte CAD dahingehend, dass Datenstrukturen zur Beschreibung von Semantik (Zuordnung einer fachlichen Bedeutung) und Topologie (Zuweisung fester räumlicher Beziehungen) der verwendeten Bauteile einbezogen und in einer zentralen Projektdatenbank abgelegt werden. Eine BIM-Software verwendet für die 3D-Modellierung i. d. R. bauteilorientierte und katalogisierte sog. generative Volumenkörper, zumeist in einer parametrisierten Darstellung (Clemen und Ehrich 2014). Der Stufenplan Digitales Planen und Bauen (BMVI 2016) gibt die Zielvorgabe, BIM ab Ende 2020 für neu zu planende Projekte des Bundes im sog. Leistungsniveau 1 regelmäßig anzuwenden und für die Zeit danach die breite Einführung von BIM voranzutreiben. Auch wenn BIM oft mit Gebäudedatenmodellierung übersetzt und darauf beschränkt wird, fasst die Methode auch im Bereich der Infrastrukturbauwerke wie Brücke,

Tunnel, Straße und Schiene Fuß. BIM stellt somit den zukünftigen Planungsstandard dar.

Sollen Geodatenbestände, die in sich konsistent in den amtlichen Koordinatenreferenzsystemen der Lage und der Höhe sind, in CAD- bzw. BIM-gestützten Planungen Berücksichtigung finden, z.B. die Hinterlegung der Eigentumsgrenzen aus ALKIS und die Beschreibung der Geländesituation über ein DGM aus ATKIS, müssen die verwendeten Koordinatensysteme dahingehend analysiert werden, ob es bei Überlagerungen zu Abweichungen kommt, die für die Planungsaufgabe und das sich daran anschließende Bauvorhaben Relevanz haben. Ebenso ist zu beachten, dass es zu Abweichungen kommen wird, wenn bei der Absteckung nach Plan-Soll in der Örtlichkeit ein Bauvorhaben im späteren Nachweis anhand amtlicher Koordinaten zu dokumentieren ist. Alle geodatenhaltenden Stellen der öffentlichen Verwaltung in Deutschland, z.B. die Straßenbauverwaltungen, sind verpflichtet, den amtlichen geodätischen Raumbezug anzuwenden, der somit zur Referenz für die eigenen Fachdaten wird.

Die nachfolgenden Betrachtungen gehen davon aus, dass die heranzuziehenden Reduktionen geodätischer Messungen in sphärischer Näherung ausreichend gut wiedergegeben werden und z. B. Lotabweichungen sowie Krümmungen der Lotlinien zu vernachlässigen sind. Nur in speziellen Situationen, wie beispielsweise bei der Vortriebskontrolle mittels Vermessungskreiseln bei Tunnelbauvorhaben, sind Lotabweichungen in Ost-West-Richtung für die Laplace-Reduktion zu beachten. Eine Reduktion vom Bogen auf die Sehne bleibt auch bei den längeren Strecken, darunter möge im Folgenden  $S_H \leq 5$  km verstanden werden, unterhalb einer Größenordnung, wie sie nachstehend als relevant angesehen wird. Zudem werden aus Anschauungsgründen Maßstabeffekte statt der in der Geodäsie üblichen Form mit ppm auch als »cm/100 m« ( $\cong 100$  ppm) angegeben. Die Bezeichnungen der Variablen erfolgen im Wesentlichen in Anlehnung an DIN 18709-6 (2016).

## 2 Grundlegende Formelbeziehungen

Handelt es sich bei  $S_H$  um eine elektrooptisch gemessene, bereits in die Horizontale reduzierte Strecke im mittleren Geländeniveau, liegt diese bei geprüften bzw. zertifizierten Messgeräten nach dem Anbringen von Kalibrierkorrekturen, der meteorologischen Korrektur und der Neigungsreduktion als Strecke mit dem Maßstab  $m = 1$  im internationalen Meter vor. Die UTM-Koordinaten gelten für eine Höhe  $h_{ell} = 0$  m bezogen auf das GRS80, so dass in der Örtlichkeit vorliegende Horizontalstrecken zu reduzieren sind.

Die Höhenreduktion auf das Referenzellipsoid für  $S_H$  zwischen den beiden Punkten  $P_1$  und  $P_2$  ergibt sich mit

$$S_{ell} = S_H \cdot \left(1 - \frac{h_{ell}}{R_B}\right) = S_H \cdot m_H = S_H \cdot (1 + \varepsilon_H). \quad (1)$$

Darin stehen  $h_{ell} = \frac{1}{2}(h_1 + h_2)$  für die mittlere ellipsoidische Höhe der beiden Endpunkte und  $R_B = \sqrt{M_B \cdot N_B}$  für den Radius der Gauß'schen Schmiegunngskugel, wobei  $N_B$  der Querkrümmungshalbmesser und  $M_B$  der Meridiankrümmungshalbmesser ist (Großmann 1976):

$$N_B = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 B)^{1/2}}, \quad (2)$$

$$M_B = \frac{a \cdot (1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 B)^{3/2}}. \quad (3)$$

Diese beiden Größen sind mit der 1. numerischen Exzentrizität

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}} \quad (4)$$

abhängig von der großen und kleinen Halbachse  $a$  und  $b$  des heranzuziehenden Referenzellipsoides. Wegen der ellipsoidischen Breite  $B$  handelt es sich bei  $N_B$  und  $M_B$  um ortsabhängige Größen. In Deutschland variieren  $N_B$  und  $M_B$  zwischen List auf Sylt und Oberstdorf im Allgäu um  $\Delta N_B \approx 2777$  m und  $\Delta M_B \approx 8317$  m, der Radius der Gauß'schen Schmiegunngskugel ändert in der Folge um  $\Delta R_B \approx 5550$  m zwischen  $\Delta R_{List} = 6385452$  m und  $\Delta R_{Oberstdorf} = 6379901$  m.

Für die Abbildungsreduktion bei der UTM-Abbildung gilt in hier ausreichender Näherung (vgl. Schödlbauer 1981, Heft 2, S. 236 ff.)

$$S_{UTM} = S_{ell} \cdot m_0 \cdot \left(1 + \frac{y_m^2}{2 \cdot m_0^2 \cdot R_B^2}\right) = S_{ell} \cdot m_{UTM}, \quad (5)$$

mit  $y_m = E_m - 500.000$  [m] als dem von dem Offset und der vorgestellten Zonennummer befreiten mittleren Ostwert  $E_m = \frac{1}{2}(E_1 + E_2)$ , d.h. dem mittleren Abstand vom Haupt- bzw. Bezugsmeridian. Ggf. kann statt (5) bei etwas längeren Strecken auch die genauere Formel

$$S_{UTM} = S_{ell} \cdot m_0 \cdot \left(1 + \frac{y_1^2 + y_1 y_2 + y_2^2}{6 \cdot m_0^2 \cdot R_B^2}\right) = S_{ell} \cdot m_{UTM}, \quad (6)$$

verwendet werden. Der Abbildungsmaßstab für den Bezugsmeridian ist bei der UTM-Abbildung mit  $m_0 = 0,9996$  ( $\cong -4$  cm/100 m) festgelegt (elliptischer Schnittzylinder), während dieser bei der Gauß-Krüger-Abbildung in Deutschland zu  $m_0 = 1$  gesetzt war (elliptischer Berührzylinder).

(1) und (5) bzw. alternativ (6) zusammengefasst führt zu

$$S_{UTM} = S_H \cdot m_H \cdot m_{UTM}. \quad (7)$$

Abgesehen davon, dass der Radius der Schmiegunngskugel eine Abhängigkeit von der ellipsoidischen Breite mit nur geringer Auswirkung sowohl in (1) als auch (5) bzw. (6) hat – die Variation  $\Delta R_B \approx 5550$  m führt am Zonenrand

in Deutschland auf einen Effekt von ca. 1 ppm –, ist die Höhenreduktion eine Funktion der ellipsoidischen Höhe  $m_H = f(h_{ell})$  und die UTM-Abbildungsreduktion eine Funktion des Ostwertes  $m_{UTM} = f(E)$ .

Für eine in der Horizontalen liegenden Fläche  $F_H$  in der Örtlichkeit ergibt sich für die entsprechende Fläche in der UTM-Abbildung

$$F_{UTM} = F_H \cdot m_H^2 \cdot m_{UTM}^2, \quad (8)$$

wenn mit  $m_H$  und  $m_{UTM}$  die für die Flächenausdehnung repräsentativen Maßstabsfaktoren bezeichnet sind.

Für die Richtungsreduktion  $\delta t = T - t$  einer konformen Abbildung, mit  $T$  als ellipsoidischen und  $t$  als verebneten Richtungswinkeln, genügt für Überschlagsrechnungen (Großmann 1976, S. 52)

$$\delta t["] = \frac{y_m \cdot \Delta x}{2 \cdot R_B^2} \rho'' \quad \text{bzw.} \quad \delta t[\text{mgon}] = \frac{y_m \cdot \Delta x}{2 \cdot R_B^2} \rho^{\text{mgon}}, \quad (9)$$

wobei  $\rho''$  und  $\rho^{\text{mgon}}$  die jeweiligen Skalierungsfaktoren sind und  $\Delta x = x_2 - x_1$  der Abszissenunterschied der beiden Endpunkte ist. Am UTM-Zonenrand, wo die Richtungsreduktion am größten ist, ergibt sich bei  $\Delta x = 5$  km ein Wert von  $\delta t = 2,8'' = 0,9$  mgon. Jedoch variiert  $\delta t$  innerhalb eines nicht zu großen Projektgebietes nur so geringfügig, dass Winkeländerungen gegenüber einem kartesischen Koordinatensystem bei der Verwendung von UTM-Koordinaten bei der hier diskutierten Fragestellung allenfalls in Ausnahmefällen (größere Gebiete am Zonenrand mit erhöhten Genauigkeitsanforderungen) berücksichtigt werden brauchen.

### 3 Eigenschaften amtlicher Koordinaten

Aus (1) ergibt sich, dass ein Fehler  $\delta h_{ell} = 6,4$  m zu einem Maßstabsfaktor von  $|\varepsilon_H| = 1$  ppm führt. Aktuell repräsentiert das German Combined QuasiGeoid 2016 (GCG2016) die Höhenbezugsfläche NHN der amtlichen Höhen in Deutschland. Die Quasigeoidhöhen bzw. synonym die Höhenanomalien  $\zeta$  gegenüber dem GRS80 variieren zwischen ca. +34 m im Küstenbereich und +50 m im Alpenraum, ihre Genauigkeiten werden seitens des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) mit 1 bis 2 cm im Küstenbereich und 3 bis 4 cm in den Alpen angegeben. Es treten bei linearer Interpolation horizontale Gradienten der Quasigeoidhöhen bis zu 1 cm/100 m auf (Liebsch 2016). Für den Zusammenhang zwischen den Gebrauchshöhen  $H$  und den Höhen  $h_{ell}$  aus einer satellitengestützten Bestimmung gilt

$$H = h_{ell} - \zeta \quad \text{bzw.} \quad h_{ell} = H + \zeta. \quad (10)$$

Eine Vernachlässigung der Quasigeoidhöhen  $\zeta$  bei der Höhenreduktion (1) bedeutet somit einen Maßstabsfehler von  $\varepsilon_\zeta = -5$  bis  $-8$  ppm. Die vermeintlich ellipsoidischen

Strecken werden dann zu groß erhalten. Verglichen mit der Situation des in Deutschland bestanschmiegenden Bessel-Ellipsoids, wo die Quasigeoidhöhen zwischen +5 m im Küstenbereich und  $-6,5$  m in Bayern lagen (astrogravimetrische Lösung 1981) und somit  $|\varepsilon_\zeta| \leq 1$  ppm gewesen ist, wird der Vernachlässigungseffekt bei Verwendung von Gebrauchshöhen  $H$  in (1) anstelle von  $h_{ell}$  beim GRS80 merklich größer. Dies bedeutet in der Konsequenz, dass bei der Auswertung tachymetrischer Messungen mittels (1) die in dem Messgebiet geltenden Quasigeoidhöhen  $\zeta$  grundsätzlich berücksichtigt werden müssen, wenn UTM-Koordinaten zu ermitteln sind – zumindest als mittlerer Wert für das Messgebiet.

Das GRS80 ist als mittleres Ellipsoid mit  $a = 6378137$  m und  $b = 6356752,314$  m spezifiziert. Darauf im ETRS89 ermittelte UTM-Koordinaten  $E, N$  (Ostwert, Nordwert) bilden ein »im Kleinen« winkeltreues, aber gegenüber der Örtlichkeit maßstäblich verzerrtes Linkssystem. Der Maßstab  $m_{UTM}$  wächst ausgehend vom Hauptmeridian quadratisch mit dem Ostwert  $E$  an (Dehnung durch Projektionsverzerrung). Am Hauptmeridian ist  $m_{UTM}(y=0) = -4$  cm/100 m, am Zonenrand ( $\pm 3^\circ$  bzgl. des Hauptmeridians) mit  $|y_m| \approx 226$  km (ohne Überlappung mit der benachbarten Zone bei  $B \approx 47,4^\circ$ ) beträgt  $m_{UTM}(y=\text{max}) \approx +2,3$  cm/100 m. Der Abstand  $y_m = y_S$ , bei dem eine ellipsoidische Strecke längentreu abgebildet wird ( $S_{UTM} \triangleq S_{ell}$ ), ergibt sich zu

$$y_S = \pm m_0 \cdot R_B \cdot \sqrt{\frac{2}{m_0} - 2}, \quad (11)$$

so dass  $m_{UTM} \approx 1$  bei  $|y_m| \approx 180$  km erhalten wird. In dem Bereich  $|y_m| < 180$  km verstärken sich der Effekt aus  $m_H$  und  $m_{UTM}$ , da beide Faktoren kleiner 1 sind.

Berechnet man die Gradienten des Maßstabsfaktors  $m_{UTM}$ , ergeben sich die Werte der Tab. 1, also z.B. ein Zuwachs von 4,9 ppm pro km bei einem Abstand von 200 km vom Hauptmeridian. Im Vergleich dazu gelten für Gauß-Krüger-Koordinaten  $m_{GK}(y=0) = 1$  und beim  $3^\circ$ -Meridianstreifensystem ohne Beachtung eines Überlappungsbereiches  $m_{GK}(y=\text{max}) \approx m_{GK}(y \approx 113 \text{ km}) \approx +1,6$  cm/100 m. Die Gradienten des Maßstabsfaktors  $m_{GK}$  beträgt maximal 2,8 ppm pro km. Da  $m_{GK}$  stets größer als 1 und von wenigen Ausnahmen abgesehen für alle Bereiche in Deutschland beim Bessel-Ellipsoid  $m_H$  kleiner als 1 gewesen ist, haben sich die beiden Faktoren weitgehend neutralisiert. Dadurch waren Maßstabsabweichungen zwischen einer Strecke in der CAD-gestützten Planung und der Örtlichkeit so gering, dass dies für die Praxis im Allgemeinen unberücksichtigt blieb. Siehe hierzu auch die Abb. 2.

Auf den Umstand, dass es für die Vermessungspraxis nunmehr bedeutsam ist, die Höhen- und UTM-Ab-

Tab. 1: Gradienten von  $m_{UTM}$  (vgl. Heckmann 2011a)

$y_m$ [km]	0	50	100	113	150	200	226
$\frac{\partial m_{UTM}}{\partial y_m}$ [ppm/km]	0,0	1,2	2,4	2,8	3,7	4,9	5,5

bildungsreduktion nicht mehr zu vernachlässigen, wird z. B. in der Informationsbroschüre der Freien Hansestadt Bremen (HB 2016) hingewiesen. Vergleichbare publizierte Informationen gibt es auch in anderen Bundesländern.

#### 4 Maßstab und Quasigeoidhöhen eines Projektgebietes

Sofern es die Variationen sowohl der ellipsoidischen Höhen als auch die Ost-West-Ausdehnung zweckmäßig erscheinen lassen, ist es möglich, die Auswirkungen der Höhen- und UTM-Abbildungsreduktion in einem begrenzten Gebiet für eine anstehende Planungs- bzw. Baumaßnahme in einem Projektmaßstab zu kondensieren. Unter Projektmaßstab bzw. gemeinschaftlicher Maßstabsfaktor  $m_P$  wird damit das Produkt des Effektes durch die Höhen- und die UTM-Abbildungsreduktion verstanden:

$$m_P = m_H \cdot m_{UTM}. \quad (12)$$

In HB (2016) ist im Abschnitt »Handlungsempfehlung« ausgesagt, dass ein solcher gemeinschaftlicher Maßstabsfaktor  $m_P$  für die Belange des Liegenschaftskatasters in Bremen als auch in Bremerhaven verwendet werden kann. Der Maßstabsfaktor  $m_P$  ist nur für die Lagekoordinaten relevant. Ziel der Umsetzung einer Planung muss es stets sein, ein Sollmaß  $S$  unverzerrt in die Örtlichkeit zu übertragen, d. h.  $S_{\text{örtl.}} = S_{CAD} = S_{BIM}$ . Im Regelfall wird nicht nach Maßen, sondern nach Koordinaten abgesteckt. Dazu werden die Koordinaten der Planung in das Messsystem, z. B. ein Tachymeter, geladen und in die Örtlichkeit übertragen.

Wichtig ist es zunächst, sich die Größenordnung des Projektmaßstabes und seine Variation innerhalb des zu betrachtenden Projektgebietes zu vergegenwärtigen. Dies kann schnell und einfach mit Hilfe des in Abb. 1 wiedergegebenen Excel-Sheets erfolgen.<sup>1</sup> In die grauen Felder sind die Lage- und Höhenkoordinaten  $E, N, H$  der vier Eckpunkte des Gebietes einzutragen. Sollten die UTM-Koordinaten in einem frühen Projektstadium dazu noch nicht verfügbar sein, können diese mit dem WebAtlasDE unter [http://sg.geodatenzentrum.de/web\\_bkg\\_webmap/applications/webatlasde/webatlasde.html](http://sg.geodatenzentrum.de/web_bkg_webmap/applications/webatlasde/webatlasde.html) ermittelt werden, wobei sich allerdings alle Angaben auf die Zone 32 (Bezugsmeridian  $L_0 = 009^\circ E$ ) beziehen und kein automatischer Wechsel auf die Zone 33 erfolgt, wie dies für die amtlichen Koordinaten in Bereichen östlich von  $L_0 = 012^\circ E$  erforderlich ist. Darüber hinaus bieten die Länder ihrerseits entsprechende Internet-Kartendienste an, z. B. den BayernAtlas oder den NiedersachsenViewer. Um erweiterten Zugang zu erhalten, wie es für einen Koordinatenabgriff teilweise erforderlich ist, ist ggf. eine (kostenfreie) Registrierung gefordert. Die Zonenziffer ist beim Ostwert  $E$  im Excel-Sheet mit einzugeben. Die UTM-

Koordinaten  $E, N$  werden in ellipsoidische Koordinaten  $B, L$  konvertiert, wie diese zur Onlineberechnung von Quasigeoidhöhen mit dem GCG2016 unter <http://gibs.bkg.bund.de/geoid/gscmp.php?p=g> erforderlich sind. Sind eingangs nur Gebrauchshöhen  $H$  bekannt, ist iterativ vorzugehen. Die online berechneten Größen  $h_{ell}$  sowie  $\zeta$  sind in die vorgesehenen Felder des Excel-Sheets einzutragen. Die Maßstabsfaktoren  $m_H, m_{UTM}$  und  $m_P$  werden dann für die Eckpunkte, als gemittelte Werte für die vier Ränder des Gebietes sowie für den Schwerpunkt errechnet. Zudem werden die horizontalen Gradienten des Quasigeoids an den Randlinien ausgegeben. Sollte das Projektgebiet den Hauptmeridian  $L_0$  überspannen, ist es in einen Bereich östlich und westlich von  $L_0$  aufzuteilen.

Für ein Gebiet mit einer ellipsoidischen Länge von  $L \approx 009^\circ E$  in größerer Meereshöhe ergibt sich in Deutschland der größte Effekt für den Projektmaßstab  $m_P$ . Exemplarisch gezeigt ist dies für die Ortslage Schwenningen (Heuberg) auf der Schwäbischen Alb auf ca. 870 m NHN. Hier wird  $m_P = -5,4$  cm/100 m. Die einfachste Form, ein Plan-Soll spannungsfrei in die Örtlichkeit zu übertragen, ist das Arbeiten mit Maßen und einem Bezugspunkt sowie Vorgabe der Orientierung. Man arbeitet so in einem Sondernetz mit dem Maßstab  $m = 1$ , d. h. methodisch gesehen mittels einer Kongruenztransformation, und verletzt damit jedoch Nachbarschaftsbeziehungen in der Örtlichkeit, wenn diese mit amtlichen Geodaten verglichen werden.

Ein nach Plan-Soll errichtetes Gebäude mit den Grundrissmaßen 20,000 m  $\times$  40,000 m wird im gezeigten Beispiel in der Projektion im Liegenschaftskataster mit 19,989 m  $\times$  39,978 m angegeben. Die DIN 18202 (2013) legt Toleranzen  $T$  für Bauwerke im Bereich Hochbau fest. Für Maße im Grundriss bei Nennmaßen zwischen 15 m und 30 m ist  $T = \pm 24$  mm, bei Nennmaßen  $> 30$  m ist  $T = \pm 30$  mm. Ausgehend von der Regel  $\sigma \leq 0,2 \cdot T$ , sind die Maße mit einer Standardabweichung von  $\sigma \leq 9,6$  mm bzw.  $\sigma \leq 12,0$  mm abzustecken, also Beträgen, die kleiner sind, als es der durch eine Missachtung der Auswirkung von  $m_P$  bei einer Absteckung nach Koordinaten hervorgerufene Effekt wäre. Eine Fläche verringert sich im gezeigten Beispiel durch  $m_P$  um ca. 0,1 % ihres Wertes, was nur bei größeren Flächen auf relevante Absolutgrößen führt.

Der Radius eines Bogens bei einer Trassierung ändert sich, wenn man als Beispiel  $r = 1000$  m als Plan-Soll annimmt, zu  $r_{UTM} = 999,46$  m in der Projektion und damit im Planwerk bzw. zu  $r_{\text{örtl.}} = 1000,54$  m, wenn  $m_P$  bei der Absteckung nach UTM-Koordinaten missachtet wird. Die Fahrdynamik dürfte letztlich nicht beeinflusst sein, wenn  $m_P$  nicht berücksichtigt wird, formale Gesichtspunkte und die Linienführung bei der Einhaltung von Zwangspunkten möglicherweise schon. Die Neigungen des Quasigeoids gegenüber dem GRS80 betragen in Schwenningen  $|\Delta\zeta| \approx 0,3$  cm/100 m sowohl in Ost-West- als auch in Nord-Süd-Richtung.

Für das Innenstadtgebiet von Bremen als ein weiteres Beispiel, für das gilt  $L \approx 009^\circ E$  und  $h_{ell} \approx 45$  m, ergibt sich  $m_P = -4,1$  cm/100 m. Die Geoidneigung Ost-West

<sup>1</sup> Auf Wunsch kann die Datei zur Verfügung gestellt werden.



im Raum Bremen ist praktisch Null und in Nord-Süd-Richtung  $\Delta\zeta^{N-S} \approx 0,2 \text{ cm}/100 \text{ m}$ . Für die Innenstadt von München mit ca. 191 km östlich des Hauptmeridians  $L = 009^\circ E$  und ca. 520 m NHN ist  $m_p = -0,4 \text{ cm}/100 \text{ m}$ . Hier ist die Geoidneigung Nord-Süd nahezu Null und in Ost-West-Richtung  $\Delta\zeta^{E-W} \approx -0,2 \text{ cm}/100 \text{ m}$ . Schon diese drei Beispiele zeigen, dass sich je nach Lage und mittlerer Höhe des Projektgebietes  $m_H, m_{UTM}$  und die horizontalen Gradienten  $\Delta\zeta$  deutlich unterscheiden.

Aus dem Vergleich der Werte für die Eckpunkte, für die Randlinien und für den Schwerpunkt nach dem Schema der Abb. 1 ergibt sich eine Aussage, ob ein Arbeiten mit einem gemeinschaftlichen Maßstabsfaktor zweckmäßig ist. Entscheidend ist dabei die Ost-West-Ausdehnung des Projektgebietes. Weichen die Höhenwerte in den Eckpunkten stark von den Höhen ab, wie sie sonst innerhalb des Projektgebietes anzutreffen sind, muss dies ggf. zusätzlich berücksichtigt werden.


Projektmaßstab aufgrund der Höhen- und UTM-Abbildungsreduktion

$$S_{UTM} = S_H \cdot m_H \cdot m_{UTM} = S_H \cdot m_p$$

Projekt: **Exemplarisch Schweningen (Heuberg)**

Mit  $E, N$  und  $H$  sind die 4 Eckpunkte NW, NE, SE und SW des Projektgebiets vorzugeben:  
[http://sg.geodatenzentrum.de/web\\_bkg\\_webmap/applications/webatlasde/webatlasde.html](http://sg.geodatenzentrum.de/web_bkg_webmap/applications/webatlasde/webatlasde.html)

Die Felder für  $h$  und  $\zeta$  ergeben sich mit Hilfe der BKG-Onlineberechnung und Eingabe von  $B, L$ :  
<http://gibs.bkg.bund.de/geoid/gscomp.php?p=g>



<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><th colspan="2">NW-Punkt</th></tr> <tr><td><math>E=</math></td><td>32500000,000 m</td></tr> <tr><td><math>N=</math></td><td>5329000,000 m</td></tr> <tr><td><math>H=</math></td><td>870,000 m NHN</td></tr> <tr><td><math>B=</math></td><td>48,11426112 °</td></tr> <tr><td><math>L=</math></td><td>9,0000000 °</td></tr> <tr><td><math>h=</math></td><td>918,923 m</td></tr> <tr><td><math>\zeta=</math></td><td>48,923 m</td></tr> <tr><td><math>m_H^{NW} =</math></td><td>0,9998560</td></tr> <tr><td><math>m_{UTM}^{NW} =</math></td><td>0,9996000</td></tr> <tr><td><math>m_p^{NW} =</math></td><td>0,9994560</td></tr> </table>	NW-Punkt		$E=$	32500000,000 m	$N=$	5329000,000 m	$H=$	870,000 m NHN	$B=$	48,11426112 °	$L=$	9,0000000 °	$h=$	918,923 m	$\zeta=$	48,923 m	$m_H^{NW} =$	0,9998560	$m_{UTM}^{NW} =$	0,9996000	$m_p^{NW} =$	0,9994560	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><th colspan="2">NE-Punkt</th></tr> <tr><td><math>E=</math></td><td>32501000,000 m</td></tr> <tr><td><math>N=</math></td><td>5329000,000 m</td></tr> <tr><td><math>H=</math></td><td>870,000 m NHN</td></tr> <tr><td><math>B=</math></td><td>48,1142603 °</td></tr> <tr><td><math>L=</math></td><td>9,0134353 °</td></tr> <tr><td><math>h=</math></td><td>918,890 m</td></tr> <tr><td><math>\zeta=</math></td><td>48,890 m</td></tr> <tr><td><math>m_H^{NE} =</math></td><td>0,9998560</td></tr> <tr><td><math>m_{UTM}^{NE} =</math></td><td>0,9996000</td></tr> <tr><td><math>m_p^{NE} =</math></td><td>0,9994561</td></tr> </table>	NE-Punkt		$E=$	32501000,000 m	$N=$	5329000,000 m	$H=$	870,000 m NHN	$B=$	48,1142603 °	$L=$	9,0134353 °	$h=$	918,890 m	$\zeta=$	48,890 m	$m_H^{NE} =$	0,9998560	$m_{UTM}^{NE} =$	0,9996000	$m_p^{NE} =$	0,9994561
NW-Punkt																																													
$E=$	32500000,000 m																																												
$N=$	5329000,000 m																																												
$H=$	870,000 m NHN																																												
$B=$	48,11426112 °																																												
$L=$	9,0000000 °																																												
$h=$	918,923 m																																												
$\zeta=$	48,923 m																																												
$m_H^{NW} =$	0,9998560																																												
$m_{UTM}^{NW} =$	0,9996000																																												
$m_p^{NW} =$	0,9994560																																												
NE-Punkt																																													
$E=$	32501000,000 m																																												
$N=$	5329000,000 m																																												
$H=$	870,000 m NHN																																												
$B=$	48,1142603 °																																												
$L=$	9,0134353 °																																												
$h=$	918,890 m																																												
$\zeta=$	48,890 m																																												
$m_H^{NE} =$	0,9998560																																												
$m_{UTM}^{NE} =$	0,9996000																																												
$m_p^{NE} =$	0,9994561																																												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><th colspan="2">SW-Punkt</th></tr> <tr><td><math>E=</math></td><td>32500000,000 m</td></tr> <tr><td><math>N=</math></td><td>5328000,000 m</td></tr> <tr><td><math>H=</math></td><td>870,000 m NHN</td></tr> <tr><td><math>B=</math></td><td>48,1052641 °</td></tr> <tr><td><math>L=</math></td><td>9,0000000 °</td></tr> <tr><td><math>h=</math></td><td>918,899 m</td></tr> <tr><td><math>\zeta=</math></td><td>48,899 m</td></tr> <tr><td><math>m_H^{SW} =</math></td><td>0,9998560</td></tr> <tr><td><math>m_{UTM}^{SW} =</math></td><td>0,9996000</td></tr> <tr><td><math>m_p^{SW} =</math></td><td>0,9994560</td></tr> </table>	SW-Punkt		$E=$	32500000,000 m	$N=$	5328000,000 m	$H=$	870,000 m NHN	$B=$	48,1052641 °	$L=$	9,0000000 °	$h=$	918,899 m	$\zeta=$	48,899 m	$m_H^{SW} =$	0,9998560	$m_{UTM}^{SW} =$	0,9996000	$m_p^{SW} =$	0,9994560	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><th colspan="2">SE-Punkt</th></tr> <tr><td><math>E=</math></td><td>32501000,000 m</td></tr> <tr><td><math>N=</math></td><td>5328000,000 m</td></tr> <tr><td><math>H=</math></td><td>870,000 m NHN</td></tr> <tr><td><math>B=</math></td><td>48,1052633 °</td></tr> <tr><td><math>L=</math></td><td>9,0134330 °</td></tr> <tr><td><math>h=</math></td><td>918,865 m</td></tr> <tr><td><math>\zeta=</math></td><td>48,865 m</td></tr> <tr><td><math>m_H^{SE} =</math></td><td>0,9998560</td></tr> <tr><td><math>m_{UTM}^{SE} =</math></td><td>0,9996000</td></tr> <tr><td><math>m_p^{SE} =</math></td><td>0,9994561</td></tr> </table>	SE-Punkt		$E=$	32501000,000 m	$N=$	5328000,000 m	$H=$	870,000 m NHN	$B=$	48,1052633 °	$L=$	9,0134330 °	$h=$	918,865 m	$\zeta=$	48,865 m	$m_H^{SE} =$	0,9998560	$m_{UTM}^{SE} =$	0,9996000	$m_p^{SE} =$	0,9994561
SW-Punkt																																													
$E=$	32500000,000 m																																												
$N=$	5328000,000 m																																												
$H=$	870,000 m NHN																																												
$B=$	48,1052641 °																																												
$L=$	9,0000000 °																																												
$h=$	918,899 m																																												
$\zeta=$	48,899 m																																												
$m_H^{SW} =$	0,9998560																																												
$m_{UTM}^{SW} =$	0,9996000																																												
$m_p^{SW} =$	0,9994560																																												
SE-Punkt																																													
$E=$	32501000,000 m																																												
$N=$	5328000,000 m																																												
$H=$	870,000 m NHN																																												
$B=$	48,1052633 °																																												
$L=$	9,0134330 °																																												
$h=$	918,865 m																																												
$\zeta=$	48,865 m																																												
$m_H^{SE} =$	0,9998560																																												
$m_{UTM}^{SE} =$	0,9996000																																												
$m_p^{SE} =$	0,9994561																																												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><th colspan="2">Projektausdehnung:</th></tr> <tr><td><math>S_H^{NW-NE} =</math></td><td>1000,000 m</td></tr> <tr><td><math>S_H^{NE-SE} =</math></td><td>1000,000 m</td></tr> <tr><td><math>S_H^{SE-SW} =</math></td><td>1000,000 m</td></tr> <tr><td><math>S_H^{SW-NW} =</math></td><td>1000,000 m</td></tr> </table>	Projektausdehnung:		$S_H^{NW-NE} =$	1000,000 m	$S_H^{NE-SE} =$	1000,000 m	$S_H^{SE-SW} =$	1000,000 m	$S_H^{SW-NW} =$	1000,000 m	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><th colspan="4">Projektmaßstäbe an den Randlinien:</th></tr> <tr><td><math>m_p^{NW-NE} =</math></td><td>0,9994560</td><td><math>\hat{=}</math></td><td>-5,44 cm/100m</td></tr> <tr><td><math>m_p^{NE-SE} =</math></td><td>0,9994561</td><td><math>\hat{=}</math></td><td>-5,44 cm/100m</td></tr> <tr><td><math>m_p^{SE-SW} =</math></td><td>0,9994560</td><td><math>\hat{=}</math></td><td>-5,44 cm/100m</td></tr> <tr><td><math>m_p^{SW-NW} =</math></td><td>0,9994560</td><td><math>\hat{=}</math></td><td>-5,44 cm/100m</td></tr> </table>	Projektmaßstäbe an den Randlinien:				$m_p^{NW-NE} =$	0,9994560	$\hat{=}$	-5,44 cm/100m	$m_p^{NE-SE} =$	0,9994561	$\hat{=}$	-5,44 cm/100m	$m_p^{SE-SW} =$	0,9994560	$\hat{=}$	-5,44 cm/100m	$m_p^{SW-NW} =$	0,9994560	$\hat{=}$	-5,44 cm/100m														
Projektausdehnung:																																													
$S_H^{NW-NE} =$	1000,000 m																																												
$S_H^{NE-SE} =$	1000,000 m																																												
$S_H^{SE-SW} =$	1000,000 m																																												
$S_H^{SW-NW} =$	1000,000 m																																												
Projektmaßstäbe an den Randlinien:																																													
$m_p^{NW-NE} =$	0,9994560	$\hat{=}$	-5,44 cm/100m																																										
$m_p^{NE-SE} =$	0,9994561	$\hat{=}$	-5,44 cm/100m																																										
$m_p^{SE-SW} =$	0,9994560	$\hat{=}$	-5,44 cm/100m																																										
$m_p^{SW-NW} =$	0,9994560	$\hat{=}$	-5,44 cm/100m																																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><th colspan="2">Projektfläche:</th></tr> <tr><td><math>F_H =</math></td><td>1,000 km<sup>2</sup></td></tr> </table>	Projektfläche:		$F_H =$	1,000 km <sup>2</sup>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><th colspan="4">Projektmaßstab im Schwerpunkt:</th></tr> <tr><td><math>\bar{m}_p =</math></td><td>0,9994560</td><td><math>\hat{=}</math></td><td>-5,44 cm/100m</td></tr> </table>	Projektmaßstab im Schwerpunkt:				$\bar{m}_p =$	0,9994560	$\hat{=}$	-5,44 cm/100m																																
Projektfläche:																																													
$F_H =$	1,000 km <sup>2</sup>																																												
Projektmaßstab im Schwerpunkt:																																													
$\bar{m}_p =$	0,9994560	$\hat{=}$	-5,44 cm/100m																																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><th colspan="2">Schwerpunktkoordinaten:</th></tr> <tr><td><math>\bar{E} =</math></td><td>32500500,000 m</td></tr> <tr><td><math>\bar{N} =</math></td><td>5328500,000 m</td></tr> <tr><td><math>\bar{h} =</math></td><td>918,894 m</td></tr> </table>	Schwerpunktkoordinaten:		$\bar{E} =$	32500500,000 m	$\bar{N} =$	5328500,000 m	$\bar{h} =$	918,894 m	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><th colspan="4">Gradienten der Quasigeoidhöhen an den Randlinien:</th></tr> <tr><td><math>\Delta\zeta^{NW-NE} =</math></td><td>0,033 m</td><td><math>\hat{=}</math></td><td>0,33 cm/100m</td></tr> <tr><td><math>\Delta\zeta^{NE-SE} =</math></td><td>0,025 m</td><td><math>\hat{=}</math></td><td>0,25 cm/100m</td></tr> <tr><td><math>\Delta\zeta^{SE-SW} =</math></td><td>-0,034 m</td><td><math>\hat{=}</math></td><td>-0,34 cm/100m</td></tr> <tr><td><math>\Delta\zeta^{SW-NW} =</math></td><td>-0,024 m</td><td><math>\hat{=}</math></td><td>-0,24 cm/100m</td></tr> </table>	Gradienten der Quasigeoidhöhen an den Randlinien:				$\Delta\zeta^{NW-NE} =$	0,033 m	$\hat{=}$	0,33 cm/100m	$\Delta\zeta^{NE-SE} =$	0,025 m	$\hat{=}$	0,25 cm/100m	$\Delta\zeta^{SE-SW} =$	-0,034 m	$\hat{=}$	-0,34 cm/100m	$\Delta\zeta^{SW-NW} =$	-0,024 m	$\hat{=}$	-0,24 cm/100m																
Schwerpunktkoordinaten:																																													
$\bar{E} =$	32500500,000 m																																												
$\bar{N} =$	5328500,000 m																																												
$\bar{h} =$	918,894 m																																												
Gradienten der Quasigeoidhöhen an den Randlinien:																																													
$\Delta\zeta^{NW-NE} =$	0,033 m	$\hat{=}$	0,33 cm/100m																																										
$\Delta\zeta^{NE-SE} =$	0,025 m	$\hat{=}$	0,25 cm/100m																																										
$\Delta\zeta^{SE-SW} =$	-0,034 m	$\hat{=}$	-0,34 cm/100m																																										
$\Delta\zeta^{SW-NW} =$	-0,024 m	$\hat{=}$	-0,24 cm/100m																																										

Abb. 1: Beispiel der Ermittlung des Projektmaßstabes und der Quasigeoidhöhen

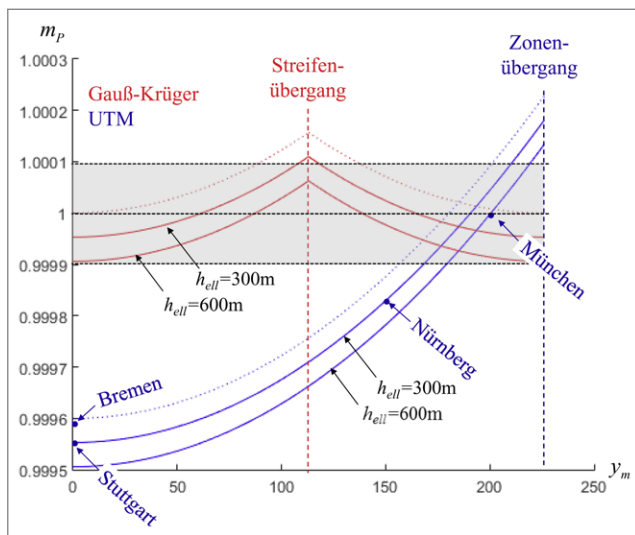


Abb. 2: Projektmaßstäbe für GK- und UTM-Koordinaten bei exemplarischen Höhen über dem Ellipsoid

Die Abb. 2 zeigt exemplarisch die Projektmaßstäbe, wie sie sich bei Gauß-Krüger- und UTM-Koordinaten bei ellipsoidischen Höhen von 300 m und 600 m ergeben. Für  $h_{ell} = 0$  m gelten die gepunkteten Linien. Der grau hinterlegte Bereich besagt, dass die aus einem Projektmaßstab  $m_p$  resultierenden Effekte kleiner als 1 cm auf 100 m bleiben. Man sieht, dass dies praktisch durchgehend bei Gauß-Krüger-Koordinaten der Fall gewesen ist. Dies erklärt, warum Abweichungen zwischen einer Strecke in der CAD-gestützten Planung und der Örtlichkeit so gering sind, dass dies für die Praxis im Allgemeinen vernachlässigt wurde – mitunter aber auch aus Unkenntnis der Zusammenhänge.

## 5 Folgerungen für die Praxis

Ergebnis einer Abschätzung nach dem in Abb. 1 dargestellten Schema kann sein, dass der Maßstab  $m_p$  in einem Gebiet, wo ein Planungs- oder Bauvorhaben ansteht, eine so geringe Auswirkung hat, dass dies nicht weiter beachtet werden muss. Dies dürfte etwa für den Raum München zutreffen, wobei eine solche Aussage immer auf das anstehende Vorhaben individuell bezogen werden muss. Führt eine Abschätzung zur Relevanz des Projektmaßstabes dazu, dass der Effekt im Weiteren zu berücksichtigen ist, ergeben sich für die Maßstabsunterschiede zwischen einer auf amtlichen Koordinaten  $E, N$  basierenden Planungsunterlage und einer Planung mit kartesischen Koordinaten  $X, Y$  im CAD verschiedene Möglichkeiten (vgl. Heckmann 2011b). Es sei dabei unterstellt, dass mit einem gemeinschaftlichen Faktor  $m_p$  vorgegangen werden kann und seine Variation  $\Delta m_p$  im Projektgebiet zu tolerieren ist. Winkeländerungen brauchen, siehe (9), nicht berücksichtigt werden. Damit wird hinsichtlich der Lage Ähnlichkeit der Geometrie in beiden Koordinatensystemen ( $m = const.$ ) unterstellt.

Die methodischen Möglichkeiten sind:

- Skalierung des Plan-Solls mit dem Projektmaßstab  $m_p$ , z.B. durch Einrechnung in die Trassierungselemente und die Bemaßungen, und unmittelbare Nutzung der UTM-basierten Geodatenbestände. Die Skalierung erfolgt dabei so, dass in der Örtlichkeit später die gewünschten Sollmaße  $S$  vor der Skalierung erreicht werden. Geplant wird dann nicht in dem Maßstab  $m = 1$ . Zu fordern wäre dann, dass eine CAD- oder BIM-Software eine solche Option bietet.
- Transformation der UTM-basierten amtlichen Basisdatenbestände, z.B. des umliegenden Festpunktfeldes, mit dem Kehrwert  $m_p^{-1}$ , so dass diese praktisch örtlichen Maßen entsprechen, und ein unmittelbares Verwenden von CAD-Bemaßungen, d.h. ein Arbeiten im Maßstab  $m = 1$ . Dabei ist allerdings zu beachten, dass es sich um ggf. umfangreiche Basisdatenbestände handelt, die zu transformieren sind. Mit der koordinatenbasierten Absteckung von den bei der Planung einbezogenen Festpunkten aus wird erreicht, dass das Plan-Soll unverzerrt in die Örtlichkeit übertragen wird.
- Das Arbeiten mit kartesischen Koordinaten  $X, Y$  im CAD und das Anlegen eines Sondernetzes mit dem Maßstab  $m = 1$  für die Absteckung, was jedoch dazu führt, dass die Nachbarschaft zu Objekten, die in den amtlichen Basisdatenbeständen dokumentiert und ggf. für die Baumaßnahme zu beachten sind (z.B. Grenzabstände, Zwangspunkte), gestört wird.

Beachtet werden muss das verwendete Lage-Koordinatensystem der Planungssoftware, ob hier  $X, Y$  oder ggf.  $E, N$  zu Grunde gelegt ist. Teilweise führen bereits die vielen Vorkommastellen der amtlichen Koordinaten zu Problemen bei der Eingabe und Darstellung. Ferner ist zu beachten, dass bei einer 2D-Ähnlichkeitstransformation über identische Punkte (u.a. Niemeier 2002), bei der die beiden Translationen und die Rotation um die Vertikalrichtung die Starrkörperanteile darstellen, ggf. eine Überführung von einem Links- in ein Rechtssystem bzw. umgekehrt erfolgen muss. Die Rotation resultiert aus dem Bezug zu Gitternord der amtlichen Koordinaten und der gebräuchlichen Ausrichtung der CAD- bzw. BIM-Koordinaten zu den Hauptachsen des Bauwerks. Eine eindeutige Kennzeichnung der verwendeten Koordinatenreferenzsysteme ist in jedem Falle zu fordern – diesbezüglich klare Vorgaben müssen bereits in den gegenwärtig entwickelten Standardisierungen und Regelwerken bei BIM Berücksichtigung finden. In DIN 18709-6 (2016, 3.14, Anm. 2) heißt es: »Der Begriff Koordinatenreferenzsystem ... umfasst zusätzlich zur mathematischen Definition des Koordinatensystems auch Teile der Formatierung, wie die Reihenfolge der Koordinaten und deren Maßeinheit. Bei ebenen Abbildungen können die Koordinaten weitere Unterscheidungsmerkmale enthalten, die für das betreffende Abbildungsverfahren vereinbart sind.«

Abzusteckende Höhen einer Planung sind infolge der impliziten Forderung nach Horizontalität und Vertikalität

grundsätzlich als Gebrauchshöhen  $H$  zu verstehen. Damit erfolgt unmittelbar der Wechsel von einer Tangentialebene im CAD zu den gekrümmten Verhältnissen des Erdkörpers. Das geometrische Nivellement liefert ebenso wie die trigonometrische Höhenbestimmung unter Berücksichtigung der Erdkrümmungsreduktion  $r_E = S_H^2 \cdot (2R_B)^{-1}$  im Nahbereich in der Praxis hier relevanter Aufgabenstellungen auch ohne Schwerefeldkorrekturen de facto Normalhöhenunterschiede. Werden in einem Projekt auch satellitengestützt Höhen bestimmt, kommt die Genauigkeit des Quasigeoids zum Tragen. Dabei sind die Referenzstationen unter Umständen mehrere km entfernt. Die Neigungen des Quasigeoids sind in vielen Regionen in Deutschland in einer Größenordnung, siehe das Beispiel der Abb. 1, dass auch bei kleinräumigen Projekten eine Berücksichtigung geboten ist.

Die Nichtparallelität der  $Z$ -Richtungen bei der Übertragung in die Örtlichkeit führt auf einen Konvergenzwinkel  $\gamma$  benachbarter vertikaler Wände oder Pylone in Folge der Konvergenz der Lotrichtung. In sphärischer Näherung gilt

$$\gamma = \frac{S_H}{R_B} \rho \approx 0,1 \text{ mgon} / 10 \text{ m Horizontalstecke} . \quad (13)$$

Ein Bauwerksmaß im Grundriss ändert sich somit mit der Höhe, wenn die Endpunkte übereinander in der Vertikalen liegen. Nimmt man eine Strecke  $S_H = 100 \text{ m}$ , so verlängert sich diese bei  $\Delta H = 20 \text{ m}$  um  $0,3 \text{ mm}$ . Das Beispiel zeigt, dass der Effekt (13) diesbezüglich im Allgemeinen keine Bedeutung hat, jedoch führt die Lotkonvergenz zur Höhenreduktion (1).

Grundlegendes Ziel ist es, eine CAD- oder BIM-gestützte Planung unverzerrt in die Örtlichkeit zu übertragen, d.h. Gebäudemaße oder Radien bei Trassierungen bei der Absteckung nicht zu verändern. Geht man pauschal von einer zu Grunde gelegten Genauigkeit  $\sigma_m \approx 10 \text{ ppm}$  ( $\approx 0,1 \text{ cm}/100 \text{ m}$ ) für zu errichtende Gebäude und Ingenieurbauwerke aus, können die Variationen des Maßstabs  $\Delta m_p$  in einem Projektgebiet normalerweise vernachlässigt werden und das Arbeiten mit einem für das Projektgebiet repräsentativen Faktor  $m_p$  ist möglich. Über eine 2D-Ähnlichkeitstransformation können dann den praktischen Erfordernissen entsprechend die Lagekoordinaten umgerechnet werden. Bauausführungsvermessung und Baufortschrittsdokumentation bedingen einen wiederkehrenden Datenaustausch zwischen dem virtuellen Plan-Soll und Umsetzung in der Realität. Dieser Datenaustausch erfolgt standardmäßig auf Basis von Koordinaten, was das Thema Koordinatenreferenzsysteme virulent macht.

Kritisch ist der Fall, wenn nach CAD bzw. BIM geplante Fertigteile im Maßstab  $m = 1$  hergestellt wurden, die später in die Örtlichkeit eingepasst werden müssen, ohne dass der Maßstab  $m_p$  bei der Absteckung bedacht wurde. Die skizzierten Beispiele zeigen, dass Toleranzen hier schnell ausgeschöpft bzw. sogar überschritten sind, wenn

ein solches Fertigteil zwischen nach UTM-Koordinaten abgesteckten Auflagern oder Widerlagern einzufügen ist. Bei Trassierungen ist zu beachten, dass diese neben der Trasse auch die Ingenieurbauwerke einbinden. Das oft praktizierte Arbeiten mit Sondernetzen mit dem Maßstab  $m = 1$  für die Ingenieurbauwerke und daneben amtlichen Koordinaten für den Gesamtverlauf einer Trasse, da diese unter Nutzung der Geobasisdaten entworfen wurde, um z.B. Zwangspunkte zu berücksichtigen, führt insbesondere bei Brücken und Tunneln in Bögen und bei Klothoiden zu gewissen Unstetigkeiten an den Übergangsstellen. Angesichts der hohen Qualität und Homogenität der Realisierung des amtlichen geodätischen Raumbezugs (Heckmann et al. 2015) stellt sich die generelle Frage nach der zukünftigen Bedeutung von Sondernetzen in der Praxis bei solchen Aufgaben.

Ein weiterer Bereich, wo ggf. der Einfluss eines Maßstabes  $m_p$  zu beachten ist, sind Befliegungen und das Mobile Mapping, wenn Passpunkte mit ihren UTM-Koordinaten zur Festlegung des Maßstabes in den Bilderverbänden und Punktwolken herangezogen werden. Solche Bestandsdokumentationen sind oft Grundlage für Entwurfs-, Genehmigungs- und Ausführungsplanungen.

## 6 Fazit

Das Problembewusstsein, dass infolge des Bezugssystemwechsels zwischen einer CAD- bzw. BIM-gestützten Planung und amtlichen Geodaten bezüglich der Lagekoordinaten ein Maßstabseffekt gegenüber den Maßen in der Örtlichkeit gegeben ist, der sich je nach Lage innerhalb der UTM-Zone und der mittleren NHN-Höhe unterschiedlich darstellt und eine Größenordnung erreichen kann, die für eine Planung von Relevanz ist, muss bei allen Beteiligten in einem Projekt gegeben sein.

Maße aus Plandarstellungen im ETRS89/UTM sind gegenüber der Örtlichkeit maßstäblich verzerrt. Der Faktor  $m_p$  ist eine projektspezifische Größe. In solchen Plandarstellungen konstruierte Bauteile oder Trasselemente sollen jedoch unverzerrt in die Örtlichkeit übertragen werden. Ohne Berücksichtigung von  $m_p$  in einer der dargelegten Varianten ist dies nicht möglich. Eine Abschätzung mit einem wie in Abb. 1 dargestellten Schema kann jedoch auch dazu führen, dass der Effekt wegen Geringfügigkeit vernachlässigt werden darf.

Da heute von »Jedermann« mit GNSS-Empfängern gemessen wird, muss allen Beteiligten bei satellitengestützten Höhenbestimmungen der Umgang mit Quasigeoidhöhen bekannt sein. Ggf. leistet der Korrekturdienst bereits eine Überführung in Gebrauchshöhen  $H$ , wenn der Rover entsprechend konfiguriert ist. Die Kenntnis der Quasigeoidhöhen in einem Messgebiet ist grundsätzlich auch bei der Höhenreduktion (1) erforderlich.

Zu fordern ist in jedem Projekt eine dokumentierte und abgestimmte Vorgehensweise, welche Koordinatenreferenzsysteme nach Lage und Höhe in welcher Projektphase

von welcher Software benutzt werden, also auch von der in einem Messsystem wie Tachymeter oder GNSS-Rover implementierten Software. Andernfalls besteht die Gefahr, dass es zu u.U. folgenreichen Missverständnissen kommt, wenn z.B. ein maßgefertigtes Bauteil ( $m = 1$ ) in der Örtlichkeit bei verwendeten UTM-Koordinaten ( $m \neq 1$ ) für den Einbau nicht passt. In der Örtlichkeit bestimmte Spannmaße, den Sollmaßen einer Planung gegenübergestellt, bieten eine praktikable Möglichkeit der Kontrolle und somit Vermeidung solcher Situationen.

### Literatur

- ADV (Hrsg.): Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland. 2014. [www.adv-online.de](http://www.adv-online.de) → ADV-Produkte → Festpunkte, Zugriff 11/2016.
- BMVI (Hrsg.): Stufenplan Digitales Planen und Bauen. [www.bmvi.de](http://www.bmvi.de) → Digitales und Raumentwicklung → Digitale Agenda – Digitales Bauen, Zugriff 11/2016.
- Borrmann, A., König, M., Koch, C., Beetz, J. (Hrsg.): Building Information Modeling – Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015. ISBN 978-3-658-05605-6.
- Clemen, C., Ehrich, R.: Geodesy goes BIM. In: avn, Heft 6/2014, S. 231–237.
- DIN 18202: Toleranzen im Hochbau – Bauwerke. Beuth-Verlag, Berlin, 2013.
- DIN 18709-6: Begriffe, Kurzzeichen und Formelzeichen in der Geodäsie – Teil 6: Geodätische Bezugssysteme und Bezugsflächen. Beuth-Verlag, Berlin, 2016.
- Großmann, W.: Geodätische Rechnungen und Abbildungen in der Landesvermessung. Vermessungswesen bei Konrad Wittwer, Stuttgart, 1976, 3. Aufl.
- [HB] Freie Hansestadt Bremen (Hrsg.): UTM-Abbildung, Information und Handlungsempfehlung. [www.geo.bremen.de](http://www.geo.bremen.de) → Vermessung → Raumbezug, Zugriff 11/2016.
- Heckmann, B.: Gauß-Krüger und UTM – Gemeinsamkeiten und Unterschiede beider Abbildungen. Fortbildungsveranstaltung des VSVI Hessen e.V. am 16.11.2011 in Friedberg/Hessen. [http://vsvi-hessen.de/download/download\\_archiv.html](http://vsvi-hessen.de/download/download_archiv.html), 2011a.
- Heckmann, B.: Maßstabsabweichungen zwischen dem UTM-Koordinatensystem und realen Sollstrecken in der Örtlichkeit. Fortbildungsveranstaltung des VSVI Hessen e.V. am 16.11.2011 in Friedberg/Hessen. [http://vsvi-hessen.de/download/download\\_archiv.html](http://vsvi-hessen.de/download/download_archiv.html), 2011b.
- Heckmann, B., Berg, G., Heitmann, S., Jahn, C.H., Klausner, B., Liebsch, G., Liebscher, R.: Der bundeseinheitliche geodätische Raumbezug – integriert und qualitätsgesichert. In: zfv 3/2015, S. 180–184.
- Kreitlow, S., Brettschneider, A., Jahn, C.H., Feldmann-Westenhoff, U.: ETRS89/UTM – Der Bezugssystemwechsel und die Auswirkungen auf die Geodatennutzung (2010). [www.adv-online.de](http://www.adv-online.de) → Geodätische Grundlagen → Transformation, Zugriff 11/2016.
- Liebsch, G.: Perspektiven, Vorteile und Möglichkeiten des Raumbezugs 2016. Vortrag INTERGEO® Hamburg, 2016. Vortragsarchiv Kongress unter [www.intergeo.de](http://www.intergeo.de), Zugriff 11/2016.
- Niemeier, W.: Ausgleichsrechnung. Walter de Gruyter Berlin New York, 2002. ISBN 3-11-014080-2.
- Schödlbauer, A.: Rechenformeln und Rechenbeispiele zur Landesvermessung (2 Hefte). Wichmann-Verlag, Karlsruhe, 1981.

### Anschrift des Autors

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke  
 Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie  
 Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg  
[otto.heunecke@unibw.de](mailto:otto.heunecke@unibw.de)

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter [www.geodaesie.info](http://www.geodaesie.info).