

# Sensor Data Fusion for Navigation Systems for the Extraction of Raw Materials in the Deep Sea

Copper ores are found in massive sulphide deposits in the rift zones of the oceans. For the exploration and mining of these hydrothermally formed and very small-scale heterogeneously structured deposits, exact position data of the mining equipment used and also of the individual mining tools are required. At depths of over 2,000 m, navigation has to manage without the support of

established navigation systems and is carried out using inertial measurement systems. These must be designed to meet the requirements of the deep-sea environment as well as the extreme vibration stresses from the mining process. The use of robust electronic sensors requires compensation for drift and interference by means of Kalman filtering.

## Sensordatenfusion für die Navigationssystematik zur Rohstoffgewinnung in der Tiefsee

Kupfererze finden sich in den Massivsulfidlagerstätten in den Riftzonen der Ozeane. Für die Erforschung und den Abbau dieser hydrothermal gebildeten und sehr kleinteilig heterogen strukturierten Lagerstätten sind exakte Positionsdaten der zum Einsatz kommenden Abbaugeräte und auch der einzelnen Abbauwerkzeuge erforderlich. Eine Navigation muss in Meerestiefen von über 2.000 m ohne Stützung der etablierten Navigationssysteme aus-

kommen und erfolgt mittels inertialer Messsysteme. Diese sind sowohl für die Anforderungen der Tiefseeumgebung als auch die extremen Schwingungsbeanspruchungen aus dem Abbauprozess auszulegen. Die Nutzung robuster elektronischer Sensoren erfordert eine Kompensation von Drift und Störeinflüssen mittels Kalman-Filterung.

### 1 Growing demand for raw materials due to electrification

The ongoing electrification of many areas of life, such as heat generation and transportation, is creating a rapidly increasing demand for the raw materials required for this. In addition to critical minerals such as lithium, cobalt and graphite, this is primarily copper, which is essential as a key raw material in large quantities for generators, transformers, motors and cables, and for which demand is projected to be around five times the currently available mining capacity by 2030. This cannot be met in the short term by developing new mines on the mainland. (1)

Due to the long service life of many electrical systems, no secondary market can be developed here in the short term, so the focus is primarily on increasing productivity, e.g. through semi-autonomization of mining equipment, in existing mines and the development of known deposits in the deep sea.

### 2 Raw materials in the deep sea

Minerals in the deep sea that are of interest for mining can be roughly divided into three groups, which are distinguished not only in terms of their origin and occurrence, but also in terms of the

### 1 Wachsende Rohstoffbedarfe durch Elektrifizierung

Die fortschreitende Elektrifizierung vieler Lebensbereiche wie Wärmegewinnung und Transport erzeugt einen schnell steigenden Bedarf für die dafür notwendigen Rohstoffe. Neben kritischen Mineralien wie Lithium, Kobalt oder Graphit ist dies vor allem Kupfer, das als Schlüsselrohstoff in großen Mengen für Generatoren, Transformatoren, Motoren und Leitungen unerlässlich ist, und bei dem nach Hochrechnungen die Nachfrage bis 2030 bei etwa dem fünffachen der aktuell verfügbaren Bergbaukapazität liegen wird. Diese kann kurzfristig nicht durch die Erschließung neuer Bergwerke auf dem Festland gedeckt werden. (1)

Durch die hohe Langlebigkeit vieler elektrischer Anlagen kann hier kein Sekundärmarkt zeitnah erschlossen werden, sodass vor allem die Produktivitätssteigerung, z. B. durch Semi-Autonomisierung der Abbaugeräte, in bestehenden Bergwerken sowie die Erschließung bekannter Lagerstätten in der Tiefsee in den Fokus rücken.

### 2 Rohstoffe in der Tiefsee

Für den Bergbau interessante Mineralien in der Tiefsee können grob in drei Gruppen unterteilt werden, die nicht nur hinsichtlich

extraction technology used. These groups are manganese nodules, cobalt-rich crusts and massive sulphides.

The economic use of manganese nodules formed in the deep sea has been studied since the 1960s. The current debate about mining projects in the Clarion-Clipperton Zone (CCZ) off Hawaii is also increasingly part of the political discussion about the effects and consequences of deep-sea mining. Manganese nodules are mainly found in the shallow basins of the deep sea. Current projects for their exploitation rely on mobile, ground-based extraction systems.

Cobalt-rich crusts are formed by the deposition of minerals dissolved in seawater on exposed rock in areas of volcanic activity.

Massive sulphides form at the edges of rift zones as a result of the interaction of plate tectonics and water cycles. Due to the high pressure of the water column, deep water is forced into fissures in the basalt mantle at great depths, where it is heated to approximately 500 to 600 °C. As a result, minerals and other substances are released. As a result, minerals and sulphur are dissolved in the water in high concentrations and the water rises again elsewhere. When it emerges and comes into contact with the deep water, which is around 2 °C cold, the dissolved minerals suddenly precipitate, creating the visual impression of a plume of smoke (black or white smoker). The minerals are deposited at the exit point and form the typical vent-like structures of precipitated metal-sulphur and metal-silicate compounds on the one hand and a bed of fine-grained precipitated material on the other. During its active phase, the black smoker forms a so-called mound around the exit point, which mainly contains copper, copper-iron or zinc and lead sulphides. The high pressures, temperatures and extremely low pH values do not permit the decomposition of an active smoker, but provide a habitat for organisms that are specifically geared towards heat and sulphur. After the end of activity, the mound compacts through recrystallization processes and becomes accessible for exploration as life also gradually dies out due to the loss of heat.

In the case of chalcopyrite, bornite or covellite, hydrothermally formed massive sulphides are an essential basis for copper ore mining. Typically, these deposits were formed several hundred million years ago, overlaid with sediment layers several hundred to over two thousand meters thick and compacted and recrystallized by geological processes. Typical copper contents are < 1%. Their development as open-cast mines requires the excavation of correspondingly large pits and spoil heaps. In the case of seabed massive sulphides (SMS), these ores are found relatively young and without sediment overburden; less compacted and therefore easy to dissolve, and with copper contents > 10%, making their development interesting from many aspects of extraction and subsequent processing. On the other hand, the issues of the deep sea as a habitat – still little explored in many places – and the associated protection of the environment, the extremely high pressures and the difficult accessibility of the deposits are disadvantageous. (2, 3, 4, 5)

### 3 Challenges and technical solutions

The vertical approach to deep-sea mining is a minimally invasive procedure, similar to surgery, which attempts to limit the impact at the extraction site to the absolute minimum necessary. The sediment cloud is minimized by shielding the injection point and

Entstehung und Vorkommen, sondern auch hinsichtlich der zum Einsatz kommenden Gewinnungstechnik unterschieden werden. Diese Gruppen sind Manganknollen, kobaltreiche Krusten und Massivsulfide.

In der Tiefsee gebildete Manganknollen werden bereits seit den 1960er Jahren hinsichtlich ihrer ökonomischen Verwendung untersucht. Auch die aktuelle Diskussion um Projekte zum Abbau in der Clarion-Clipperton-Zone (CCZ) vor Hawaii sind verstärkt in der politischen Diskussion über die Auswirkungen und Folgen des Tiefseebergbaus zu finden. Manganknollen finden sich vorwiegend in den flachen Becken der Tiefsee. Aktuelle Projekte zu ihrer Nutzung setzen hier auf mobile, bodengebundene Gewinnungsanlagen.

Kobaltreiche Krusten bilden sich durch die Ablagerung von im Meerwasser gelösten Mineralien auf freiliegendem Gestein in Bereichen mit vulkanischer Aktivität.

Massivsulfide entstehen an den Rändern von Riftzonen als Ergebnis der Wechselwirkung von Plattentektonik und Wasserkreisläufen. Durch den hohen Druck der Wassersäule wird Tiefenwasser in entstehende Spalten im Basaltmantel in große Tiefe gedrückt und dort auf ca. 500 bis 600 °C erhitzt. Infolgedessen werden Mineralien und Schwefel im Wasser in hoher Konzentration gelöst und das Wasser steigt an anderer Stelle wieder auf. Bei Austritt und Kontakt mit dem ca. 2 °C kalten Tiefenwasser fallen schlagartig die gelösten Minerale aus, sodass optisch der Eindruck einer Rauchfahne entsteht (Schwarzer oder Weißer Raucher). Die Mineralien lagern sich an der Austrittsstelle ab und bilden einerseits die typischen schlotartigen Strukturen aus ausgefallten Metall-Schwefel- sowie Metall-Silicat-Verbindungen, andererseits ein Bett aus feinkörnigem ausgefalltem Material. Im Lauf seiner aktiven Phase bildet der Schwarze Raucher um die Austrittsstelle einen sogenannten Mound, der vor allem Kupfer-, Kupfer-Eisen oder Zink- und Bleisulfide enthält. Die hohen Drücke, Temperaturen und extrem niedrigen pH-Werte lassen den Abbau eines aktiven Rauchers nicht zu, bieten jedoch Lebensraum für spezifisch auf Wärme und Schwefel ausgerichtete Lebewesen. Nach dem Ende der Aktivität kompaktiert der Mound durch Rekristallisationsprozesse und wird für die Exploration zugänglich, da auch das Leben infolge des Entfalls von Wärme allmählich erlischt.

Hydrothermal gebildete Massivsulfide sind im Fall von Chalkopyrit, Bornit oder Covellin eine wesentliche Grundlage für den Kupfererzbergbau. Typischerweise sind diese Lagerstätten vor mehreren hundert Millionen Jahren gebildet worden, mit Sedimentschichten von Mächtigkeiten von mehreren hundert bis über zweitausend Metern Mächtigkeit überlagert und durch geologische Prozesse kompaktiert und rekristalliert. Typische Kupfergehalte liegen bei < 1%. Ihre Erschließung als Tagebau setzt die Auffahrung entsprechend großer Gruben und Abraumhalden voraus. Im Falle der Tiefsee-Massivsulfide (Seabed Massive Sulfides – SMS) finden sich diese Erze relativ jung gewachsen und ohne Sedimentüberlagerung; wenig kompaktiert und daher leicht zu lösen, und mit Kupfergehalten > 10%, sodass deren Erschließung unter vielen Aspekten der Gewinnung und späteren Verarbeitung interessant ist. Nachteilig wirken hingegen die Fragen der Tiefsee als – an vielen Stellen noch wenig erforschtem – Lebensraum und der damit verbundene Schutz der Umwelt, die extrem hohen Drücke und die schwierige Zugänglichkeit der Lagerstätten. (2, 3, 4, 5)

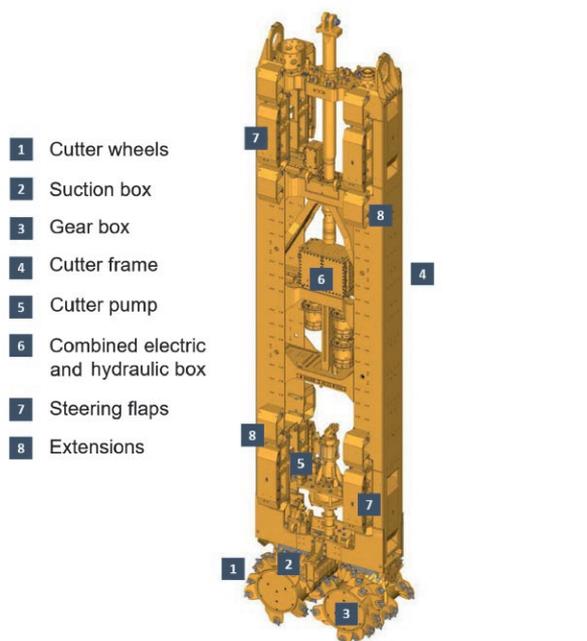


Fig. 1. Conceptual design of a Trench Cutter (6).

Bild 1. Schematische Darstellung der Schlitzwandfräse (6).

the negative pressure in the extraction system required by the process. Conveying within a closed system also prevents the formation of particle clouds. Due to the vertical mining direction, the topology of the deposit is met quite precisely and the generation of overburden is minimized (Figure 1). (6)

The boundary conditions for the design of equipment for the conditions in the German license area are:

- pressure: 250 to 300 bar,
- temperature: 2 °C, at the surface > 20 to 30 °C,
- no natural light,
- steep slopes of up to 30°,
- very uneven soils,
- highly variable composition of the subsoil,
- high porosity and strong scattering of geomechanical properties.

Massive sulphide deposits formed by black smokers are often referred to as mounds because of their shape – mounds several hundred meters in diameter and tens to 30 m high. The smokers form vents that collapse again and again over time, forming a kind of debris cone that is subject to geological transformation processes. As a result, in contrast to layers formed by sedimentation processes, e. g., the structure and mineralogical composition of the subsurface is very undefined.

## 4 Navigation system

### 4.1 Positional representations in space

Euler angles define three rotations in Euclidean space. These include the rolling motion  $\phi$  (roll), i. e. the rotation around the x-axis, the pitch movement  $\theta$  (pitch) with the rotation around the y-axis and the yaw movement  $\psi$  (yaw), a rotation around the z-axis. If these movements are carried out one after the other, the new coordinates of the rotated body in three-dimensional space can be defined by multiplying the respective rotation matrices. (7, 8)

## 3 Herausforderungen und technische Lösungen

Der Vertikale Ansatz (Vertical Approach) für den Tiefseebergbau versucht, als ein minimalinvasiver Eingriff, ähnlich wie in der Chirurgie, den Impakt an der Abbaustelle auf das absolut notwendige Minimum zu beschränken. Durch Abschirmungen der Einstichstelle sowie den verfahrensbedingt notwendigen Unterdruck im Abbausystem wird die Sedimentwolke minimiert. Die Förderung innerhalb eines geschlossenen Systems vermeidet ebenfalls das Entstehen von Partikelwolken. Durch die vertikale Abbaurichtung werden die Topologie der Lagerstätte recht genau getroffen und die Erzeugung von Abraum minimiert (Bild 1). (6)

Die Randbedingungen für die Auslegung von Ausrüstungen für die Gegebenheiten im deutschen Lizenzgebiet sind:

- Druck: 250 bis 300 bar,
- Temperatur: 2 °C, an der Oberfläche > 20 bis 30 °C,
- kein natürliches Licht,
- starke Hangneigungen bis 30°,
- sehr unebene Böden,
- stark wechselnde Zusammensetzungen des Untergrunds,
- hohe Porositäten und starke Streuung geomechanischer Eigenschaften.

Durch Schwarze Raucher entstehende Massivsulfidablagerungen werden aufgrund ihrer Form häufig als Mound bezeichnet – Hügel von einigen hundert Metern Fußdurchmesser und einigen zehn bis dreißig Metern Höhe. Die Raucher bilden Schlote, die im Lauf der Zeit immer wieder kollabieren und so eine Art Schuttkegel bilden, der geologischen Transformationsprozessen unterliegt. Dadurch ist der Untergrund, im Gegensatz zu beispielsweise durch Sedimentationsprozesse geformten Schichten, sehr unbestimmt in seinem Aufbau und in seiner mineralogischen Zusammensetzung.

## 4 Navigationssystematik

### 4.1 Lagedarstellungen im Raum

Eulerwinkel definieren drei Drehungen im euklidischen Raum. Dazu zählen die Rollbewegung  $\phi$  (engl. roll), d.h. die Rotation um die x-Achse, die Nickbewegung  $\theta$  (engl. pitch) mit der Rotation um die y-Achse und die Gierbewegung  $\psi$  (engl. yaw), eine Rotation um die z-Achse. Werden diese Bewegungen nacheinander ausgeführt, lassen sich die neuen Koordinaten des rotierten Körpers im dreidimensionalen Raum durch Multiplikation der jeweiligen Rotationsmatrizen fest definieren. (7, 8)

Aufgrund des Kommutativgesetzes bei der Matrizenmultiplikation ist eine feste Rotationsreihenfolge einzuhalten. Neben den sechs Möglichkeiten wird in dieser Arbeit die z-y-x Konvention nach DIN 9300 und DIN ISO 8855 gewählt (Bild 2):

$$R_{zyx} = R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\phi)$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{pmatrix}$$

Erfolgt beim zweiten Rotationsschritt, dem Nicken, eine Drehung um  $\pm 90^\circ$ , führt dies zu einer kardanischen Blockade (engl. gimbal lock), da sich die x-Achse des Körpers mit der z-Achse des Referenzsystems dieselbe Achse teilt und somit ein Freiheitsgrad verloren geht. Die unabhängig gewählten Winkel  $\psi$  und  $\phi$  führen

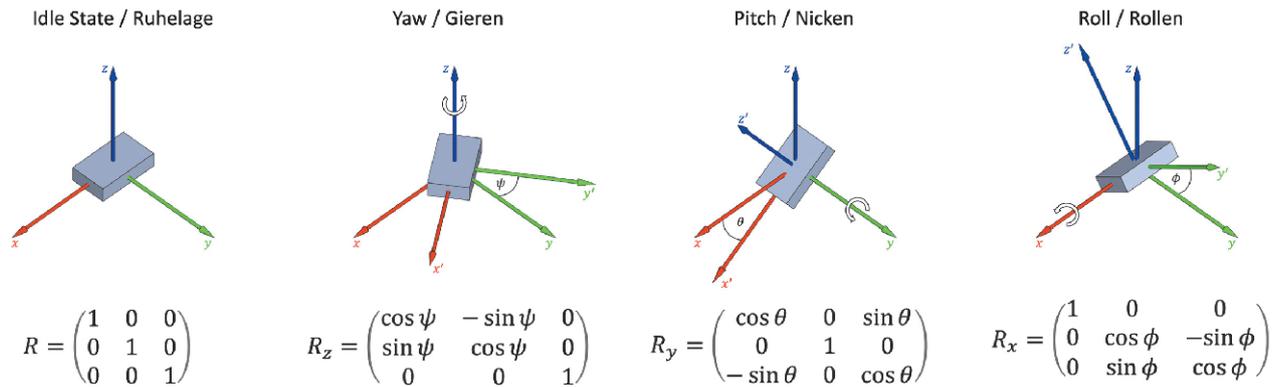


Fig. 2. Position representations. // Bild 2. Lagedarstellungen im Raum. Source/Quelle: TUBAF

Due to the commutative law of matrix multiplication, a fixed rotation sequence must be observed. In addition to the six possibilities, the z-y-x convention according to DIN 9300 and DIN ISO 8855 is chosen in this work (Figure 2):

$$R_{zyx} = R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\phi)$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{pmatrix}$$

If a rotation of  $\pm 90^\circ$  occurs during the second rotation step, the pitching, this leads to a gimbal lock, as the x-axis of the body shares the same axis as the z-axis of the reference system and therefore one degree of freedom is lost. The independently selected angles  $\psi$  and  $\phi$  lead to a transformation that only has one parameter. To avoid this error, the positional representation can also be calculated using quaternions, an extension of the complex numbers. However, Euler angles are used in parallel for simpler visualization and better understanding. (9, 10, 11, 12, 13)

## 4.2 Coordinate systems

Different coordinate transformations are necessary so that the geographical coordinates can be determined with an alternative mobile measuring device, similar to the global navigation satellite system. The corresponding transformation matrix is multiplied by the known spatial coordinates. Due to the orthogonality of the matrix, a reverse transformation is possible using both the inverse and the transposed mapping matrix:

$$p^n = R^{nb}p^b$$

$$p^b = (R^{nb})^{-1}p^n = (R^{nb})^T p^n = R^{bn}p^n$$

The body-fixed coordinate system (b-frame) is fixed to the object to be tracked, which means that the axes of the system are always in the same orientation relative to the body, regardless of the rotation or acceleration applied. The origin of the navigation coordinate system (n-frame) or local Cartesian coordinate system is identical to the body-fixed coordinate system. The  $x^n$ - and  $y^n$ -axes always point in an easterly or northerly direction and are parallel to the tangential plane of the simplified earth model. The  $z^n$ -axis is correspondingly parallel to the gravitational acceleration. The navigation coordinate system can either be oriented as local east-north-up (ENU) coordinates or local north-east-down (NED) coordinates. The present work refers to the ENU system. The inertial coordinate system (i-frame) is located at the center of the Earth model, with the coordinate

zu einer Transformation, die nur noch einen Parameter besitzt. Um diesen Error zu umgehen, kann die Lagedarstellung auch mit Hilfe von Quaternion, einer Erweiterung der komplexen Zahlen, berechnet werden. Aufgrund der einfacheren Anschaulichkeit und zum besseren Verständnis werden jedoch parallel Eulerwinkel genutzt. (9, 10, 11, 12, 13)

## 4.2 Koordinatensysteme

Damit die geographischen Koordinaten ähnlich wie beim globalen Navigationssatellitensystem mit einer alternativen mobilen Messeinrichtung bestimmt werden können, sind unterschiedliche Koordinatentransformationen notwendig. Dabei wird die entsprechende Transformationsmatrix mit den bekannten Raumkoordinaten multipliziert. Eine Rücktransformation ist aufgrund der Orthogonalität der Matrix sowohl mit Hilfe der inversen als auch der transponierten Abbildungsmatrix möglich:

$$p^n = R^{nb}p^b$$

$$p^b = (R^{nb})^{-1}p^n = (R^{nb})^T p^n = R^{bn}p^n$$

Das körperfeste Koordinatensystem (b-frame) ist dabei mit dem zu verfolgenden Objekt fest verbunden, wodurch sich die Achsen des Systems immer in der gleichen Ausrichtung relativ zum Körper befinden, unabhängig von der ausgeübten Rotation oder Beschleunigung. Der Ursprung des Navigationskoordinatensystems (n-frame) bzw. lokalen kartesischen Koordinatensystems ist identisch mit dem körperfesten Koordinatensystem. Die  $x^n$ - und  $y^n$ -Achse weisen hierbei stets in Ost- bzw. Nordrichtung und liegen parallel zur Tangentialebene des vereinfachten Erdmodells. Die  $z^n$ -Achse steht entsprechend parallel zur Schwerebeschleunigung. Das Navigationskoordinatensystem kann entweder als lokale Ost-, Nord-, Aufwärtskoordinaten (engl. East-North-Up (ENU)) oder lokale Nord-, Ost-, Abwärtskoordinaten (engl. North-East-Down (NED)) ausgerichtet sein. Die vorliegende Arbeit referenziert sich auf das ENU-System. Das Inertialkoordinatensystem (i-frame) befindet sich im Mittelpunkt des Erdmodells, wobei die Koordinatenachsen fest in Bezug zu den Fixsternen ausgerichtet sind und unbeachtet der Erdrotation stehen. Die  $z^i$ -Achse des Inertialkoordinatensystems entspricht der Rotationsachse der Erde, während die  $x^i$ - und  $y^i$ -Achse in der Äquatorebene liegen. Der Ursprung und die Hochachse des erdfesten Koordinatensystems (e-frame) sind identisch mit dem Inertialkoordinatensystem, welches mit der Winkelgeschwindigkeit der Erde rotiert. Die  $x^e$ -Achse ist durch die

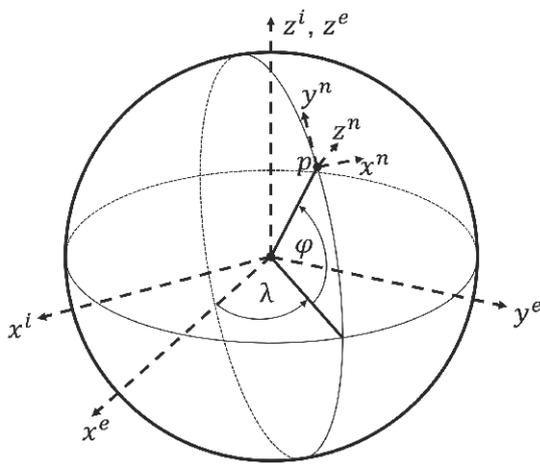


Fig. 3. Coordinate systems used.  
Bild 3. Verwendete Koordinatensysteme. Source/Quelle: TUBAF

axes fixed in relation to the fixed stars and disregarding the Earth's rotation. The  $z^i$ -axis of the internal coordinate system corresponds to the Earth's rotation, while the  $x^i$ - and  $y^i$ -axes lie in the equatorial plane. The origin and the vertical axis of the earth-fixed coordinate system (e-frame) are identical to the inertial coordinate system, which rotates at the angular velocity of the earth. The  $x^e$ -axis is determined by the intersection of the equatorial plane and the plane of the prime meridian. Due to the aforementioned properties of the Earth-fixed coordinate system, it is also referred to as a geographic or geocentric coordinate system (Earth-Centered, Earth-Fixed (ECEF)) (Figure 3). (14, 15, 16, 17)

### 4.3 Geodetic datum

A reference model of the earth must be defined so that the target coordinates  $p$  can be determined using the geographical coordinate system. A distinction must be made between the spherical and the ellipsoidal geodetic model. While the spherical model is spherical, the actual shape of the earth can be represented more precisely using a rotational ellipsoid. In addition to the world systems, e. g. the Geodetic Reference System 1980 or the World Geodetic System of 1984 (WGS 84), the choice of reference ellipsoid can also vary from region to region, as the geometric calculation surface differs from the existing geoid to varying degrees. In Europe, e. g., the Bessel ellipsoid serves as a suitable regional datum, while the global datum WGS 84 is used as a uniform basis for the Global Positioning System (GPS), among other things. (15)

### 4.4 Calculation of Cartesian coordinates from geographical coordinates

Similar to the rotation sequence for the Euler angles, a rotation matrix must be defined for the calculation of the coordinates in the geographical coordinate system, taking into account the longitude and latitude:

$$R_{zy}^e = R_z^e(\lambda)R_y^e(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \lambda & -\sin \lambda & -\sin \varphi \cos \lambda \\ \cos \varphi \sin \lambda & \cos \lambda & -\sin \varphi \sin \lambda \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix}$$

However, it should be noted that, taking into account the tangency of the navigation coordinate system, the latitude of the spherical

Schnittgerade von der Äquatorebene und der Ebene des Nullmeridians bestimmt. Aufgrund der genannten Eigenschaften des erdfesten Koordinatensystems wird dieses auch als geographisches bzw. geozentrisches Koordinatensystem (engl. Earth-Centered, Earth-Fixed (ECEF)) bezeichnet (Bild 3). (14, 15, 16, 17)

### 4.3 Geodätisches Datum

Damit die Zielkoordinaten  $p$  anhand des geographischen Koordinatensystems bestimmt werden können, muss ein Referenzmodell der Erde definiert werden. Hierbei gilt es, das sphärische vom ellipsoidischen geodätischen Modell zu unterscheiden. Während das sphärische Modell kugelförmig ist, lässt sich die tatsächliche Form der Erde mit Hilfe eines Rotationsellipsoids präziser darstellen. Die Wahl des Referenzellipsoids kann neben den Weltsystemen, z. B. dem geodätischen Referenzsystem 1980 (engl. Geodetic Reference System 1980) oder dem World Geodetic System von 1984 (WGS 84) auch regional ausfallen, da sich die geometrische Rechenfläche unterschiedlich stark vom vorliegenden Geoid unterscheidet. So dient in Europa das Bessel-Ellipsoid als passendes regionales Datum, während das globale Datum WGS 84 als einheitliche Grundlage u. a. auch für das Global Positioning System (GPS) herangezogen wird. (15)

### 4.4 Berechnung kartesischer Koordinaten aus geografischen Koordinaten

Ähnlich der Drehfolge bei den Eulerwinkeln muss für die Berechnung der Koordinaten im geographischen Koordinatensystem eine Rotationsmatrix unter Berücksichtigung des Längen-  $\lambda$  und Breitengrades  $\varphi$  definiert werden:

$$R_{zy}^e = R_z^e(\lambda)R_y^e(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \lambda & -\sin \lambda & -\sin \varphi \cos \lambda \\ \cos \varphi \sin \lambda & \cos \lambda & -\sin \varphi \sin \lambda \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix}$$

Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass unter Berücksichtigung der Tangentialität des Navigationskoordinatensystems die geographische Breite beim sphärischen nicht gleich dem des ellipsoidischen geographischen Koordinatensystems entspricht. Auch liegt beim letzten Modell der Schnittpunkt auf der z-Achse nicht mehr im Koordinatenursprung (Bild 4). (15, 18, 19)

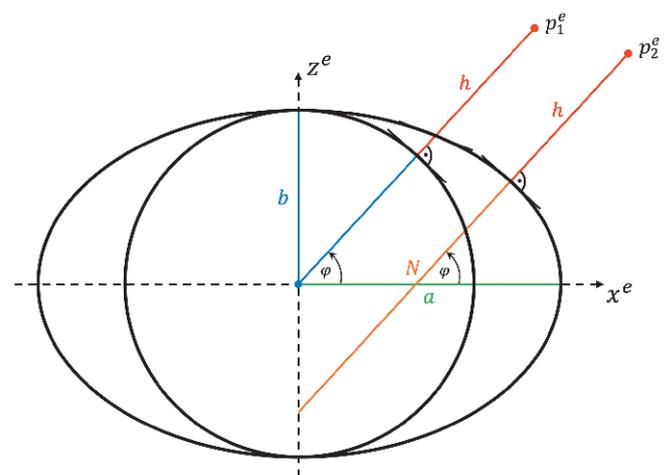


Fig. 4. Ellipsoidal versus spherical geographical coordinate system.  
Bild 4. Ellipsoidisches versus sphärisches geographisches Koordinatensystem. Source/Quelle: TUBAF

coordinate system is not the same as that of the ellipsoidal coordinate system. Also, in the last model, the intersection point on the z-axis is no longer in the coordinate origin (Figure 4). (15, 18, 19)

#### 4.5 Definition of altitude

In addition to the longitude and latitude, the total height or depth resulting from the earth radius  $b$  or the curvature radius  $N$  and the ellipsoidal height  $h$  is relevant for determining the exact position data. It is important to distinguish  $h$  from the normal height and geoid height.

#### 4.6 Inertial measuring unit

##### 4.6.1 Conceptual design and sensor selection

Various sensors are used to ensure that a location-independent measuring system can be used without restriction in real time to determine position and orientation, even without satellite reception. The sensors essentially include acceleration and angular rate sensors, which are also referred to as an inertial measurement unit (IMU). Dead reckoning is used to continuously determine the direction of movement, speed and distance traveled. While in the early days of inertial navigation the sensors were still mounted on a gimbal-mounted stabilized platform, which meant that the  $x^b y^b$ -plane was always parallel to the  $x^n y^n$ -plane respectively the  $z^b$ - and  $z^n$ -vectors were parallel, advanced strapdown systems now make it possible to connect the IMU firmly to the outer frame of the body. If the body to be observed is at rest and aligned horizontally to the earth's surface, only the acceleration due to gravity of 1 g is recorded along the  $z^b$ -, respect. the  $z^n$ -axis. If the sensor is now tilted, a proportion of the normal gravity is also detected by  $x^b$  and  $y^b$ . As long as the absolute acceleration of 1 g is not exceeded or fallen short of, the roll- and pitch angles can be calculated with the exception of the yaw angle:

$$\theta_a = -\sin^{-1}\left(\frac{g_x^b}{g}\right)$$

$$\phi_a = \sin^{-1}\left(\frac{g_y^b}{\cos \theta_a g}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{g_z^b}{\cos \theta_a g}\right)$$

The angular rate sensor, on the other hand, measures independently of the gravitational acceleration of the earth, which means that the position angles can be determined numerically over the measurement duration  $t$ , even during an acceleration or deceleration process of the body.

To determine the exerted velocity  $v^b$  and position  $p^b$ , the recorded gravitational acceleration component  $g^b$  must be subtracted not only from the  $z^b$ -axis, but also from the  $x^b$ - and  $y^b$ -axes of the recorded acceleration data, in contrast to the gimbal-mounted IMUs:

$$a_0^b(t) = a^b(t) - g^b(t) = a^b(t) - R^{bn}g^n(t)$$

$$p^b(t) = \int v^b(t) dt = \iint a_0^b(t) dt$$

Although microelectromechanical systems (MEMS) are among the comparatively less accurate measuring devices, they are very small in size and considerably cheaper due to mass production, which is why they are used in numerous computer-based mobile devices or as safety and control systems in vehicles. Compared to mechanical models, the MEMS design dominates in accelera-

#### 4.5 Definition der Höhe

Zur Bestimmung der genauen Positionsdaten ist neben dem Längen- und Breitengrad die Gesamthöhe bzw. -tiefe, resultierend aus dem Erdradius  $b$  bzw. dem Querkrümmungsradius  $N$  und der ellipsoidischen Höhe  $h$ , relevant. Hierbei gilt es,  $h$  von der Normalhöhe und Geoidhöhe zu unterscheiden.

#### 4.6 Inertiale Messeinheit

##### 4.6.1 Konzeptionierung und Sensorauswahl

Damit ein ortsunabhängiges Messsystem auch ohne Satellitenempfang uneingeschränkt in Echtzeit zur Lage und Positionsbestimmung eingesetzt werden kann, werden unterschiedliche Sensoren genutzt. Zu den Sensoren zählen wesentlich Beschleunigungs- und Drehratensensoren, die im Verbund auch als inertielle Messeinheit (IMU) bezeichnet werden. Über eine Koppelnavigation (engl. dead reckoning) lassen sich anhand dessen fortlaufend die Bewegungsrichtung, Geschwindigkeit und der zurückgelegte Weg bestimmen. Während zu Beginn der inertialen Navigation die Sensoren noch auf einer kardanisch gelagerten, stabilisierten Plattform montiert waren, wodurch die  $x^b y^b$ -Ebene stets parallel zur  $x^n y^n$ -Ebene bzw. die  $z^b$ - und  $z^n$ -Vektoren parallel stehen, besteht nun über fortgeschrittene Strapdown-Systeme die Möglichkeit, die IMU fest mit dem äußeren Rahmen des Körpers zu verbinden. Befindet sich dabei der zu beobachtende Körper in Ruhelage und ist horizontal zur Erdoberfläche ausgerichtet, so wird ausschließlich die Erdbeschleunigung von 1 g entlang der  $z^b$ - bzw.  $z^n$ -Achse aufgenommen. Wird der Sensor nun gekippt, so wird auch von  $x^b$  und  $y^b$  ein Anteil der Normalschwere detektiert. Solange die absolute Beschleunigung von 1 g nicht unter- bzw. überschritten wird, lassen sich mit Ausnahme des Gierwinkels die Roll- und Nickwinkel berechnen:

$$\theta_a = -\sin^{-1}\left(\frac{g_x^b}{g}\right)$$

$$\phi_a = \sin^{-1}\left(\frac{g_y^b}{\cos \theta_a g}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{g_z^b}{\cos \theta_a g}\right)$$

Der Drehratensensor hingegen misst unabhängig von der Schwerebeschleunigung der Erde, wodurch die Lagewinkel auch während eines Beschleunigungs- oder Abbremsvorgangs des Körpers numerisch über die Messdauer  $t$  ermittelt werden können.

Für die Bestimmung der ausgeübten Geschwindigkeit  $v^b$  und Position  $p^b$  muss im Gegensatz zu den kardanisch gelagerten IMUs der erfasste Erdbeschleunigungsanteil  $g^b$  nicht nur von der  $z^b$ -, sondern auch von der  $x^b$ - und  $y^b$ -Achse der aufgezeichneten Beschleunigungsdaten abgezogen werden:

$$a_0^b(t) = a^b(t) - g^b(t) = a^b(t) - R^{bn}g^n(t)$$

$$p^b(t) = \int v^b(t) dt = \iint a_0^b(t) dt$$

Zwar zählen Mikroelektromechanische Systeme (MEMS) zu den vergleichsweise ungenaueren Messeinrichtungen, jedoch weisen sie eine sehr geringe Baugröße auf und sind aufgrund von Massenfertigung erheblich kostengünstiger, weswegen sie in zahlreichen computerbasierten mobilen Endgeräten oder auch als Sicherheits- bzw. Regelsysteme in Fahrzeugen eingesetzt werden. Bei Beschleunigungssensoren dominiert die MEMS-Bauweise im Vergleich zu den mechanischen Modellen hinsichtlich Kompakt- und Robustheit,

tion sensors in terms of compactness and robustness, low energy consumption, low maintenance, low costs and easy handling. (15, 20, 21, 22, 23)

#### 4.6.2 Sensor model and calibration

Ideally, the three sensor axes are orthogonal to each other and measure with the same sensitivity according to the aforementioned properties. As this is not the case in practice and the inertial sensors used have a high measurement deviation due to the MEMS design, the following model function for the discrete time step  $k$  can be generally established:

$$y_k^b = SNu_k^b + b + \varepsilon_k^b$$

$b$  bias

$N$  non-orthogonality of the axes

$S$  scale factor

$u_k^b$  actual measured value

$y_k^b$  raw data

$\varepsilon_k^b$  measurement noise

The aim is to find out the actual measured values  $u_k^b$ . In order to define the faulty influencing variables specifically for the sensors used, a practical investigation is required in addition to the manufacturer's specifications. However, it should be noted that each sensor must be considered individually. As mentioned above, the absolute acceleration in any stationary position is 1 g. If the measuring device is rotated within a cardanic suspension with the sensor center at the intersection of the three supported axes, the recorded point cloud can be used to determine not only the zero offset, i. e. the bias, but also the scale factor. Ideally, the point cloud corresponds to a spherical shape with a radius of 1 g. With extreme measurement inaccuracies, however, the point cloud is more like an ellipsoid. This structure can be converted into the ideal, calibrated spherical shape using a singular value decomposition. It should be noted that the gravitational acceleration of 1 g on the earth varies depending on the position and must be

dem geringen Energieverbrauch, der Wartungsarmut, der niedrigen Kosten sowie der einfachen Handhabung. (15, 20, 21, 22, 23)

#### 4.6.2 Sensor-Modell und Kalibrierung

Ideal stehen die drei Sensorachsen orthogonal zueinander und messen mit der gleichen Empfindlichkeit nach den zuvor genannten Eigenschaften. Da dies in der Praxis nicht der Fall ist und aufgrund der MEMS-Bauweise die eingesetzten Inertialsensoren eine hohe Messabweichung aufweisen, lässt sich folgende Modellfunktion zum diskreten Zeitschritt  $k$  allgemein aufstellen:

$$y_k^b = SNu_k^b + b + \varepsilon_k^b$$

$b$  Bias

$N$  nicht-Orthogonalität der Achsen

$S$  Skalenfaktor

$u_k^b$  tatsächlicher Messwert

$y_k^b$  Rohdaten

$\varepsilon_k^b$  Messrauschen

Ziel ist es, die tatsächlich vorliegenden Messwerte  $u_k^b$  zu erfahren. Damit die fehlerhaften Einflussgrößen speziell für die eingesetzten Sensoren fest definiert werden können, ist neben den Herstellerangaben eine praktische Untersuchung erforderlich. Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass jeder Sensor individuell zu betrachten ist. Wie zuvor erwähnt, beträgt in jeder stationären Position die absolute Beschleunigung 1 g. Wird die Messeinrichtung innerhalb einer kardanischen Aufhängung mit dem Sensormittelpunkt im Schnittpunkt der drei gelagerten Achsen rotiert, so kann anhand der aufgezeichneten Punktwolke nicht nur die Nullpunktverschiebung, d. h. der Bias, sondern auch der Skalenfaktor ermittelt werden. Ideal entspricht die Punktwolke einer kugelförmigen Gestalt mit dem Radius von 1 g. Bei extremen Messungenauigkeiten gleicht die Punktwolke jedoch eher einem Ellipsoid. Über eine Singulärwertzerlegung lässt sich diese Struktur in die ideale, kalibrierte Kugelform überführen. Zu beachten ist, dass die Erdbeschleunigung von 1 g auf der Erde je nach Position variiert und unter Berücksichtigung des ausgewählten Erdmodells für die Kalibrierung einzubinden gilt.

Beim Drehratensensor ist eine stationäre Untersuchung nicht ausreichend, da damit lediglich der Bias und bei sehr präzisen Sensoren die Erdrotation aufgezeichnet würde. Wird der Drehratensensor jedoch mit einer bekannten Winkelgeschwindigkeit um eine definierte Achse rotiert, so kann die Ist-Drehrate mit der Soll-Drehrate verglichen werden. Da die Kalibriereinheit ebenfalls Messabweichungen unterliegt, wird die ausgeübte Winkelgeschwindigkeit, beispielsweise durch Ausgabe eines Rechtecksignals, mit Hilfe eines Inkrementalgebers überprüft (Bild 5). (16, 17, 24, 25, 26, 27)

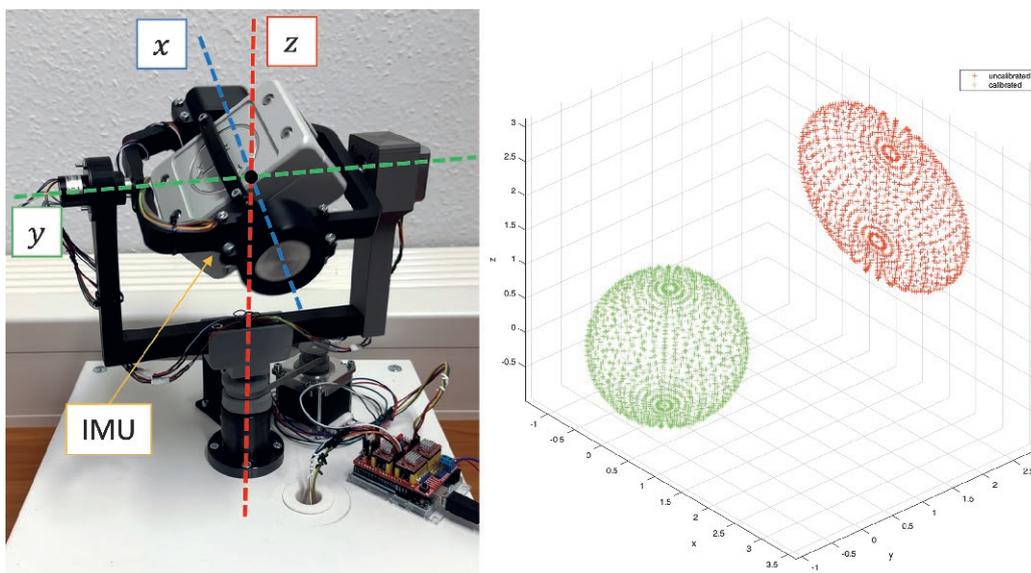


Fig. 5. Electric gimbal mounting including IMU and data plot.

Bild 5. Elektrische kardanische Aufhängung inklusive IMU und Messdaten. Source/Quelle: TUBAF

taken into account for the calibration, taking the selected earth model into account.

A stationary investigation is not sufficient for the angular rate sensor, as this would only record the bias and, in the case of very precise sensors, the earth's rotation. However, if the angular rate sensor is rotated around a defined axis at a known angular velocity, the actual angular rate can be compared with the target angular rate. As the calibration unit is also subject to measurement deviations, the applied angular velocity is checked, e. g. by outputting a square-wave signal using an incremental encoder (Figure 5). (16, 17, 24, 25, 26, 27)

#### 4.7 Temperature compensation

In addition to the IMU raw data, the temperature experienced during the measurement must also be recorded, as this is largely responsible for the size of the measurement deviations. In order to be able to derive a correction function accordingly, the IMU is loaded at rest over a specified temperature range, which is the maximum it can experience during its use. In addition to the temperature, the air pressure, humidity, mechanical vibration and also the supply voltage of the IMU have a negative influence on the measuring device. (23)

The Allan variance can be used to investigate the error characteristics and the behavior of the measuring device over a longer period of use under stationary conditions and thus to better assess the performance of the sensors used. The Allan variance is a measure of frequency stability and measures the square deviation of the individual measurements from the mean value. It is particularly useful for evaluating the stability and noise behavior of sensors. (14, 16, 21, 28, 29)

#### 4.8 Digital filters

Due to its design with its narrow moving comb structures, the MEMS accelerometer has a particularly high measurement noise, which is still present in an attenuated form even after calibration. A low-pass filter can be used to further attenuate the noise behavior, but the response varies depending on the size of the weighting factor. The stronger the weighting, the more slowly the system reacts to changes in angle.

With the angular rate sensor, on the other hand, the error component, which is still minimized after calibration, leads to a summation of the measurement deviation due to the recursive angle function, which increases steadily over the measurement period. Although a high-pass filter forces the measurement signal back to its origin, the Euler angles cannot be maintained and slow rotations cannot be mapped.

To compensate for the disadvantages with the advantages of the other sensor, it is possible to merge the measured IMU data using sensor data fusion. The simplest option here is the complementary filter, in which the low-pass filter of the acceleration sensor is combined with the high-pass filter of the angular rate sensor. The disadvantage is that the weighting factor is still fixed and remains the same over the measurement period. This is in contrast to the Kalman filter, which is also a recursive data processing algorithm, but determines the state vector probabilistically rather than heuristically. After the initialization of the variables, a prediction of the state vector is made and, after the subsequent calculation of the Kalman gain, the estimate is corrected. (14, 16, 30, 31, 32, 33)

#### 4.7 Temperaturkompensation

Neben den IMU-Rohdaten gilt es ebenfalls, die während der Messung erfasste Temperatur aufzuzeichnen, da diese maßgeblich für die Größe der Messabweichungen verantwortlich ist. Um eine Korrekturfunktion entsprechend herleiten zu können, wird die IMU in Ruhelage über einen vorgegebenen Temperaturbereich, der ihr maximal während ihres Einsatzes widerfahren kann, belastet. Neben der Temperatur haben der Luftdruck, die Luftfeuchte, die mechanische Erschütterung und auch die Versorgungsspannung der IMU einen negativen Einfluss auf die Messeinrichtung. (23)

Um die Fehlercharakteristik und das Verhalten der Messeinrichtung über eine längere Einsatzdauer hinweg unter stationären Bedingungen zu untersuchen und um dadurch die Leistung der einsetzenden Sensoren besser beurteilen zu können, bietet sich die Nutzung der Allan-Varianz an. Die Allan-Varianz ist ein Maß für die Frequenzstabilität und misst die quadratische Abweichung der einzelnen Messungen vom Mittelwert. Sie ist besonders nützlich für die Bewertung der Stabilität und des Rauschverhaltens von Sensoren (Bild 5). (14, 16, 21, 28, 29)

#### 4.8 Digitale Filter

Der MEMS-Beschleunigungssensor weist aufgrund seines Aufbaus mit seinen engen beweglichen Kammstrukturen ein besonders hohes Messrauschen auf, das auch noch nach der Kalibrierung weiterhin in geschwächter Form vorliegt. Mit Hilfe eines Tiefpassfilters kann das Rauschverhalten weiter gedämpft werden, allerdings ist das Reaktionsverhalten je nach Größe des Gewichtungsfaktors unterschiedlich groß. Je stärker die Wichtung, desto träger reagiert das System auf Winkeländerungen.

Beim Drehratensensor hingegen führt der noch nach der Kalibrierung minimierte Fehleranteil aufgrund der rekursiven Winkel-funktion zu einem Aufsummieren der Messabweichung, welche über die Messdauer hinweg stetig zunimmt. Ein Hochpassfilter zwingt das Messsignal zwar wieder in seinen Ursprung zurück, jedoch können so die Eulerwinkel nicht gehalten und langsame Rotationen nicht abgebildet werden.

Um die Nachteile mit den Vorteilen des jeweils anderen Sensors auszugleichen, besteht die Möglichkeit, mit Hilfe der Sensordatenfusion die gemessenen IMU-Daten zusammenzuführen. Die einfachste Möglichkeit bietet hierbei der Komplementärfilter, bei dem der Tiefpassfilter des Beschleunigungssensors mit dem Hochpassfilter des Drehratensensors kombiniert wird. Nachteilig ist, dass weiterhin der Gewichtungsfaktor fest eingehalten wird und über die Messdauer hinweg bestehen bleibt. Dies im Gegensatz zum Kalman-Filter, der ebenfalls ein rekursiver Datenverarbeitungsalgorithmus ist, jedoch nicht heuristisch, sondern probabilistisch den Zustandsvektor ermittelt. So erfolgt nach der Initialisierung der Variablen zunächst eine Vorhersage (Prädiktion) des Zustandsvektors und nach anschließender Berechnung der Kalman-Verstärkung eine Korrektur der Abschätzung. (14, 16, 30, 31, 32, 33)

#### 4.9 Stützungsmethoden

Damit trotz aufwendiger Kalibrierung die verbleibende Messabweichung anderweitig korrigiert werden kann, besteht die Möglichkeit, die Messeinrichtung mit weiteren Sensoren zu ergänzen.

Mit Hilfe eines Magnetfeldsensors lässt sich durch Detektion des Erdmagnetfelds ein digitaler Kompass umsetzen, wodurch eine

## 4.9 Support methods

To ensure that the remaining measurement deviation can be corrected by other means despite complex calibration, it is possible to supplement the measuring device with additional sensors.

A magnetic field sensor can be used to implement a digital compass by detecting the earth's magnetic field, whereby a defined north direction can be output, taking into account the declination, i. e. the deviation of the geographic north pole from the magnetic north pole. The sensor can therefore cooperate with the angular rate sensor in determining the yaw angle during sensor data fusion and is also referred to as the Attitude Heading Reference System (AHRS) in conjunction with the IMU. A disadvantage, however, is the very high calibration effort, as the sensors react very sensitively to metallic elements. (14, 16)

So that the height and  $z^r$ -position in relation to the calibrated zero plane can be supported in addition to the dual numerically integrated acceleration data, the height and depth information can be determined via the vertically variable ambient pressure.

As the information from vertical pressure changes is not sufficient for horizontal position support, the position is calculated via triangulation using acoustic distance and direction measurements with the help of runtime-based underwater positioning systems. The lack of light and the turbidity that arises during the milling process not only has a detrimental effect on the measurement method presented, but also on optical measurement methods. Due to the very limited installation space and space ratio in the compact diaphragm wall milling machine, the installation of large-scale measuring equipment is also extremely difficult. In addition, the high ambient pressures of up to 300 bar, the changing temperature conditions with strong vibrations and high forces acting on the system cannot be neglected, which is why the focus is on compact and robust sensors that are controlled via an intelligent algorithm with precise calibration and active monitoring in real time.

## 5 Applications, status and outlook

As part of the Deep Sea Sampling (DSS) project of the Maritime Research Program of the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Protection (BMWK), four construction stages of the measuring device were developed and tested under stationary conditions, starting with a concept prototype. The aim of the next construction stages is to develop prototypes for pressure tests to ensure pressure stability under temperature changes as well as the technical further development and calibration of the compensation mechanisms, particularly for the not inconsiderable vibration excitations from the working system of the mining machine.

In the subsequent application, the data is to be used both for navigation of the template – a unit weighing approximately 60 t – and the movement data of the milling head for determining the direction of excavation. Precise position data is particularly important for controlling the milling head, both by manual remote control and as semi-autonomous control.

Thinking further, robust and inexpensive sensors can be used to control mining processes under water, underground or even in extraterrestrial applications. Precise positioning data of the milling head and the excavation unit, even without additional support from GPS, is essential, particularly for rapid reaction to changing conditions and exact measurement of rapidly changing ground formations.

definierte Nordrichtung ausgegeben werden kann, unter Berücksichtigung der Deklination, d. h. der Abweichung des geografischen mit dem magnetischen Nordpol. Der Sensor kann somit bei der Sensordatenfusion mit dem Drehratensensor bei der Bestimmung des Gierwinkels kooperieren und wird im Verbund der IMU auch als Attitude Heading Reference-System (AHRS) bezeichnet. Nachteilig ist jedoch der sehr hohe Kalibrieraufwand, da die Sensoren sehr empfindlich auf metallische Elemente reagieren. (14, 16)

Damit die Höhe und  $z^r$ -Position in Bezug zur kalibrierten Null-ebene neben den zweifach numerisch integrierten Beschleunigungsdaten gestützt werden kann, lässt sich über den vertikal veränderlichen Umgebungsdruck die Höhen- bzw. Tiefeninformation ermitteln.

Da für eine horizontale Positionsstützung die Informationen der vertikalen Druckänderungen nicht ausreichen, wird mit Hilfe laufezeitbasierter Unterwasser-Ortungssysteme durch akustische Distanz- und Richtungsmessungen die Position über Triangulation errechnet. Das fehlende Licht und die während des Fräsens entstehende Trübung wirken sich nicht nur nachteilig auf das vorgestellte, sondern auch auf optische Messverfahren aus. Aufgrund des sehr begrenzten Bauraums und Platzverhältnisses in der kompakten Schlitzwandfräse gestaltet sich die Installation von großdimensionierten Messeinrichtungen zudem äußerst schwierig. Darüber hinaus sind die hohen Umgebungsdrücke von bis zu 300 bar, die wechselnden Temperaturbedingungen bei starken Vibrationen und hohen wirkenden Kräften der Anlage nicht zu vernachlässigen, weswegen der Fokus auf kompakte und robuste Sensoren gelegt wird, die über einen intelligenten Algorithmus mit präziser Kalibrierung und aktiver Überwachung in Echtzeit kontrolliert werden.

## 5 Applikationen, Stand und Ausblick

Im Rahmen des Projekts Deep Sea Sampling (DSS) des Maritimen Forschungsprogramms des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) wurden, beginnend mit einem Konzeptprototypen, vier Baustufen der Messvorrichtung entwickelt und unter stationären Bedingungen getestet. Ziel der kommenden Baustufen sind einerseits Prototypen für Drucktests zur Absicherung der Druckstabilität unter Temperaturwechsel sowie andererseits die technische Weiterentwicklung und Kalibrierung der Kompensationsmechanismen besonders für die nicht unerheblichen Schwingungsanregungen aus der Arbeitssystematik der Abbaumaschine.

In der späteren Anwendung sollen die Daten sowohl für die Navigation des Templates – einer ca. 60 t schweren Einheit – als auch die Bewegungsdaten des Fräskopfes für die Ermittlung der Abbaurichtung verwendet werden. Vor allem für die Steuerung des Fräskopfes, sowohl per manueller Fernsteuerung als auch als semi-autonome Regelung, sind exakte Positionsdaten von entscheidender Bedeutung.

Weiter gedacht lässt sich mittels robuster und preiswerter Sensoren die Steuerung von Abbauprozessen unter Wasser, unter Tage oder auch bei extraterrestrischen Einsätzen realisieren. Besonders für die schnelle Reaktion auf sich ändernde Gegebenheiten sowie eine exakte Einmessung von sich schnell ändernden Bodenformationen sind eine genaue Positionsdatenbestimmung des Fräskopfes und der Abbaueinheit, auch ohne zusätzliche Stützung durch GPS, unerlässlich.

## References / Quellenverzeichnis

- (1) Wood Mackenzie (2019): World Copper Report.
- (2) Sharma, R. (2017): Deep-Sea Mining. Resource Potential, Technical and Environmental Considerations. Springer-Verlag.
- (3) Johnson, K.; Dalton, G.; Masters, I. (2018): Building Industries at Sea: "Blue Growth" and the New Maritime Economy. River Publishers.
- (4) Buschette, M. (2015): Hydrothermal Alteration and Lithochemistry of the Boundary Volcanogenic Massive Sulfide (VMS) Deposits. Master Thesis, Department of Earth Science, Memorial University of Newfoundland.
- (5) Dombrowsky, J. M. (2018): Resource and Reserve Classification of a Solwara 1 type Deposit at an Arctic Mid Ocean Ridge. Norwegian University of Science and Technology, Department of Geoscience and Petroleum.
- (6) Post, J., Schreiner, V., Weixler, L. (2021): Der „Vertical Approach“ – eine nachhaltige Lösung für Probenahme und Bergbau in der Tiefsee. In: Mining Report Glückauf (157) Heft 3, S. 258–267.
- (7) ETH Zürich: Kinematics. Online abgerufen am 22.12.2023 unter <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/robotics-n-intelligent-systems/rsl-dam/documents/RobotDynamics2016/KinematicsSingleBody.pdf>.
- (8) Dong, Y. (2013): Mems for Automotive and Aerospace Applications II MEMS inertial navigation systems for aircraft. pp 177 – 219. doi:10.1533/9780857096487.2.177.
- (9) Kuipers, J. B. (1999): Quaternions and Rotation Sequences: A Primer with Applications to Orbits, Aerospace and Virtual Reality. Princeton, New Jersey, USA: Princeton University Press.
- (10) Academic dictionaries and encyclopedias. Gimbal Lock. Online abgerufen am 22.12.2023 unter <https://de-academic.com/dic.nsf/dewiki/522844>.
- (11) Jones, E. M.; Fjeld, P.: Gimbal Angles, Gimbal Lock, and a Fourth Gimbal for Christmas. Online abgerufen am 22.12.2023 unter <https://history.nasa.gov/alsj/gimbals.html>.
- (12) The MathWorks, Inc.: quaternion. Online abgerufen am: 22.12.2023 unter <https://de.mathworks.com/help/robotics/ref/quaternion.html#d123e11308>.
- (13) Baker, M. J.: Maths – Transformations using Quaternions. Online abgerufen am 22.12.2023 unter <https://www.euclidean-space.com/maths/algebra/realNormedAlgebra/quaternions/transforms/index.htm>.
- (14) Kok, M.; Hol, J. D.; Schön, T. B. (2017): Using Inertial Sensors for Position and Orientation Estimation. In: Foundations and Trends in Signal Processing: Vol. 11: No. 1–2, pp 1–153. <https://dx.doi.org/10.1561/20000000094>
- (15) Wendel, J.: Integrierte Navigationssysteme: Sensordatenfusion, GPS und inertielle Navigation. 1. Aufl., München [u. a.]: Oldenbourg.
- (16) VectorNav Technologies: Inertial Navigation Primer. Online abgerufen am 22.12.2023 unter <https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-primer>.
- (17) Madgwick, S. O. (2014): AHRS algorithms and calibration solutions to facilitate new applications using low-cost MEMS.
- (18) Gruber, F. J. (2022): Formelsammlung für das Vermessungswesen. 21. Aufl., Wiesbaden, Springer Vieweg.
- (19) The MathWorks, Inc.: Comparison of 3-D Coordinate Systems. Online abgerufen am 22.12.2023 unter <https://de.mathworks.com/help/map/choose-a-3-d-coordinate-system.html>.
- (20) Wetzstein, G. (2021): EE 267 Virtual Reality. Course Notes: 3-DOF Orientation Tracking with IMUs. Stanford, Kalifornien, USA: Stanford University, Skript.
- (21) Woodman, O. J. (2007): An introduction to inertial navigation. Cambridge, England: University of Cambridge, Computer Laboratory, Fachbericht.
- (22) Zingsheim, J. M. (2015): Inertielle Navigation für die Rohstoffindustrie – Entwicklung und Konzeptionierung eines Positions- und Lagebestimmungssystems zur weiterführenden Automatisierung von Betriebsmitteln in der untertägigen Rohstoffgewinnung. Aachen: RWTH Aachen University, Dissertation.
- (23) Tränkler, H.-R., et al. (2014): Sensortechnik – Handbuch für Praxis und Wissenschaft. Grünwald; Freiburg: Springer Vieweg, 2. völlig neu bearbeitete Aufl.
- (24) Renaudin, V.; Afzal, M. H.; Gérard Lachapelle, G. (2010): Complete Triaxis Magnetometer Calibration in the Magnetic Domain. In: Journal of Sensors, vol. 2010, Article ID 967245, 10 pages. <https://doi.org/10.1155/2010/967245>
- (25) Kok, M.; Hol, J. D.; Schön, T. B.; Gustafsson, F.; Luinge, H. (2012): Calibration of a magnetometer in combination with inertial sensors. 15th International Conference on Information Fusion, Singapore, pp. 787–793.
- (26) Kok, M.; Schön, T. B. (2016): Magnetometer Calibration Using Inertial Sensors. In: IEEE Sensors Journal, vol. 16, no. 14, pp. 5679–5689, doi: 10.1109/JSEN.2016.2569160.
- (27) Li, Q.; Griffiths, J. G. (2004): Least squares ellipsoid specific fitting. Geometric Modeling and Processing. Proceedings, Beijing, China, pp. 335–340, doi: 10.1109/GMAP.2004.1290055.
- (28) Looney, M. (2010): A simple calibration for mems gyroscopes. EDN Europe, Analog Devices.
- (29) Lv, P.; Liu, J.; Lai, J.; Kai Huang, K. (2015): Allan variance method for gyro noise analysis using weighted least square algorithm. In: Optik, Vol. 126, Issue 20, pp 2529–2534. ISSN 0030-4026, <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.06.044>.
- (30) Sanket, N. J.: Complementary Filter for Attitude Estimation. Online abgerufen am 22.12.2023 unter <https://nitijsanket.github.io/tutorials/attitudeest/imu>.
- (31) Marchthaler, R.; Dingler, S. (2017): Kalman-Filter – Einführung in die Zustandsabschätzung und ihre Anwendung für eingebettete Systeme. Esslingen am Neckar; Stuttgart: Springer Vieweg.
- (32) Chui, C. K.; Chen, G. (2009): Kalman Filtering with Real-Time Applications. College Station, Texas, USA; Hong Kong, China: Springer-Verlag.
- (33) Ludwig, S. A.; Burnham, K. D. (2018): Comparison of Euler Estimate using Extended Kalman Filter, Madgwick and Mahony on Quadcopter Flight Data. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Dallas, TX, USA, pp. 1236–1241, doi: 10.1109/ICUAS.2018.8453465.

## Authors / Autoren

Alexander Mölle M.Sc., Prof. Dr.-Ing. Martin Sobczyk, Institute of Mechanical Engineering, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg/Germany, Dr.-Ing. Matthias Semel, BAUER Maschinen GmbH, Schrobenhausen/Germany