

Kinematisches Monitoring von Führungs-, Fahr- und Leitschienen im industriellen Umfeld

Ingo NEUMANN, Dirk DENNIG, Dmitri DIENER, Christian HESSE, Johannes LINK und Johannes BUREICK

1 Einleitung

Eine schnelle und automatisierte Zustandserfassung von Schienen dient als Entscheidungsgrundlage zur Sicherstellung der Betriebssicherheit und Standzeitverlängerung. Hierbei sind sowohl der Verlauf der Schienenachse als auch die Geometrie der eigentlichen Schiene und der Schienenbefestigungen von besonderer Bedeutung. Abweichungen zur Sollgeometrie sind gemäß Richtlinien und Normen (z. B. VDI 3576, ISO 12488, ISO 8306 (zurückgezogen)) regelmäßig zu dokumentieren. Dabei ist der Prüf- und Dokumentationsprozess reproduzierbar und objektiv zu gestalten. Bisherige Vermessungsprozesse werden dieser Forderung nicht gerecht, sodass nach einem Messmittel und einem Prüf- und Dokumentationsprozess gesucht wird, der dieser Forderung vollständig nachkommt.

Im Rahmen des Beitrags wird daher ein neu entwickeltes Multi-Sensor-System (MSS) und Messverfahren zur kinematischen Positionierung und Echtzeitauswertung eines selbstfahrenden Schienenmesswagens für die Vermessung von Führungs-, Leit- und Fahrschienen vorgestellt. Mit einer Echtzeitauswertung kann die Überprüfung der Schienengeometrie im belasteten und unbelasteten Zustand während des laufenden Betriebes (z. B. für die Inbetriebnahme und Instandsetzung von Kranbahnen und Robotern) durchgeführt werden. Das System ist weitestgehend unabhängig von Schwingungen und Vibrationen, da sich der positionierende Sensor außerhalb des von Deformationen und Vibrationen beeinflussten Objektraumes befindet. Hierbei handelt es sich um das patentierte, modulare Advanced RailTrack Inspection System (ARTIS), das von Dr. Hesse und Partner Ingenieure und dem Geodätischen Institut der Gottfried Wilhelm-Leibniz-Universität Hannover entwickelt wurde. ARTIS dient primär der Vermessung der 3D-Lage von Kranschienen, des (Kranschienen-) Profilquerschnitts und erstmals auch der (Kranschienen-)Befestigungen. Durch den flexiblen Aufbau ist das System generell aber auch in der Lage sämtliche Führungs-, Fahr- und Leitschienen im industriellen Umfeld zu vermessen.

Als Mess- und Zustandsgrößen werden durch ARTIS die Lage, Höhe sowie Quer und Längsneigung der Schiene erfasst. Des Weiteren werden Ausfahrungen, Ausbrüche, Abnutzungen, Gratbildungen und Rissbildungen am Schienenkopf ermittelt. Zukünftig soll auch der Zustand der Schienenbefestigung vollständig automatisch dokumentierbar sein, der bisher auch bereits miterfasst wird. Aus den geometrischen Messungen können Größen für die statische Beurteilung, des auf den Schienen fahrenden Kranes, abgeleitet werden, indem die wirkenden Kräfte durch die Soll-Ist-Abweichungen Berücksichtigung finden. Es entsteht ein Mehrwert, von dem sowohl die Betreiber als auch Hersteller profitieren.

ARTIS besteht aus einem selbstfahrenden Messwagen mit Laserscannern, Kameras, Inklinometer, Ultraschallsensoren sowie IMU (vgl. Abb. 1). Mittels eines extern positionierten Tachymeters oder Lasertrackers kann die Trajektorie des Messwagens hochgenau bestimmt werden.

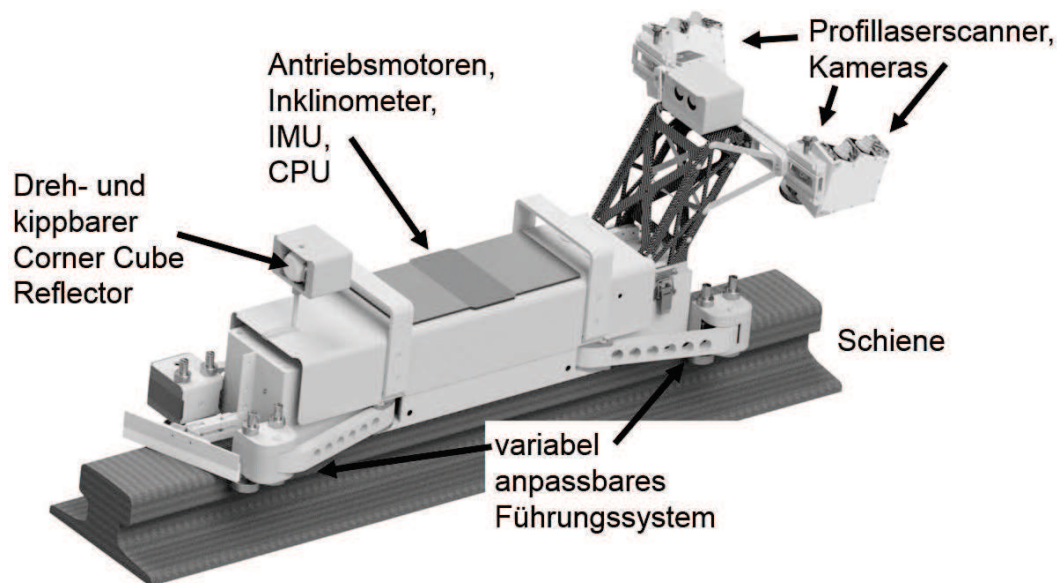


Abb. 1: Genereller Aufbau des Advanced RailTrack Inspection System (ARTIS) (DENNIG et al. 2017)

Im Rahmen des Beitrags wird zunächst der Stand der Technik erläutert und darauf aufbauend werden sowohl die Konzeption als auch der Aufbau des neu entwickelten MSS vorgestellt. Im Anschluss daran werden die Auswertekonzepte für die Bestimmung der Schienenachse als auch des Schienenkopfes mittels B-Spline-Kurven und -Flächen kurz erläutert.

2 Stand der Technik

2.1 Objektivierung des Monitorings von Führungs-, Fahr- und Leitschienen

Der Prozess der Vermessung von Kranbahnen wird aufgrund der Wettbewerbssituation und dem Einsatz moderner Vermessungsinstrumente, zusätzlicher Sensoren, Zubehör und Auswerteverfahren kontinuierlich weiterentwickelt. Die verschiedenen Normen und Richtlinien, wie z. B. die VDI 3576, definieren Zielgrößen, die durch eine Vermessung ermittelt werden müssen. Bei einer Kranbahn sind das z. B. Lage und Höhe der Schienen.

Die objektive Bestimmung der Zielgrößen setzt voraus, dass die erzielten Ergebnisse innerhalb eines reproduzierbaren Prozesses im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeit bzw. Präzision wiederholt gewonnen werden können. Dies ist bei dem aktuellen Stand der Technik (vgl. Kapitel 2.2) nicht sichergestellt, da keine kontinuierliche und hypothesenfreie Erfassung der Schiene und der Schienenachse erfolgt. Bisher führen nicht reproduzierbare Bezugs-

punkte an der Schiene bzw. insbesondere die nicht korrekte Rekonstruktion der Schienenachse zu einer subjektiven Erfassung, die vom Operator oder der aktuellen Schienenabnutzung abhängt.

Abbildung 2 zeigt hierfür exemplarisch die Definition der Schienenachse. Üblicherweise wird in der Praxis die Schienenachse aus dem linken und rechten Rand des Schienenkopfes rekonstruiert. Dabei wird lediglich im abnutzungsfreien Zustand die Schiene korrekt definiert: $(l_{re} + r_{re})/2$. Im Fall der abgenutzten Schiene erfolgt die Rekonstruktion nicht korrekt: $(w_{lre} + w_{rre})/2$. Im Folgenden soll die abnutzungsfrei rekonstruierte Schienenachse als theoretische Schienenachse bezeichnet werden und die Rekonstruktion mittels abgenutzter Schiene als praktische Schienenachse. Wie in MARJETIČ et al. (2012) und anhand typischer Schienenadapter (z. B. GOECKE GMBH & CO. KG 2017) ersichtlich ist, werden in der Praxis die abgenutzten Schienen als Bezugspunkte zur Rekonstruktion der Schienenachse herangezogen.

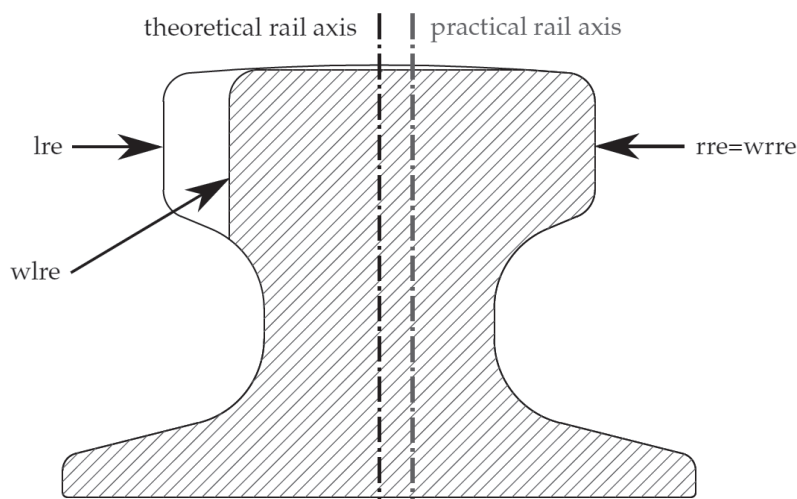


Abb. 2:
Definition der theoretischen
und praktischen Schienenachse
(DENNIG et al. 2017)

Die Auswertung der Prüfung und der Protokolle, im Idealfall durch einen Sachverständigen, setzt Erfahrung voraus. Die Erfassung zusätzlicher, für die Bewertung relevanter Parameter, z. B. die Abnutzung der Schiene oder der Zustand der Schienenbefestigung, ist derzeit nicht geregelt. Die durchgehende manuelle Erfassung durch Personal ist zeitaufwendig, subjektiv und birgt ein hohes Fehlerpotenzial. Im Kapitel 3 und 4 wird gezeigt werden, dass durch die Neuentwicklung von ARTIS eine Objektivierung und eine korrekte (patentierbare) Rekonstruktion der theoretischen Schienenachse möglich ist.

2.2 Vermessung von Führungs-, Fahr- und Leitschienen

Betrachtet man die Vermessung von einzelnen Führungs-, Leit- und Fahrschienen im industriellen Umfeld, sind bisher keine Messsysteme bekannt, die die Aufnahme der relevanten Zielgrößen (wie z. B. Schienenquerschnitt und -befestigungen) auch nur annähernd erlauben. Einzig im Bereich der Kranbahnvermessung existieren einzelne Systeme, auf die in der aus NEUMANN & DENNIG (2011) aufbereiteten und aktualisierten Zusammenstellung näher eingegangen wird. Die wichtigsten Kenngrößen der Systeme werden in der Tabelle 1 zusammengefasst. Weitere Informationen finden sich auch in MÖSER (2016).

Soweit bekannt ist die Firma DEMAG Cranes and Components GmbH die erste Firma in Deutschland, die ein System zur automatisierten Vermessung von Kranbahnen entwickelt hat (BAUMANN 2004). Das Vermessungsprinzip basiert auf einem Laser, der eine Achse in Längsrichtung der Schiene projiziert und einem Schienenmesswagen, der selbstständig entlang der Schiene fährt und jede Abweichung von der Achse registriert. Der Schienenmesswagen bleibt während der Messung stehen. Die Spurweite wird manuell, durch einen handelsüblichen Laserabstimmmesser, am Anfang und Ende der Kranbahn, festgestellt. Voraussetzung für die korrekte Funktion ist, dass alles, was Erschütterungen auslösen kann, ruhen muss. Das bedeutet in der Praxis, dass auch benachbarte Kranbahnen bis zur Beendigung der Messung nicht in Betrieb sein dürfen.

Die Firma ThyssenKrupp GfT Gleistechnik GmbH hat das System RailControl entwickelt, welches in der Funktionsweise mit den im Folgenden geschilderten Systemen von Konecranes und hpm vergleichbar ist. RailControl basiert auf einem Schienenmesswagen, der selbstständig oder an einen Kran befestigt die Kranbahn abfährt. Mit einem, wenn möglich in der Schienenachse platzierten, Tachymeter wird ein, auf dem Schienenmesswagen montierter, Reflektor verfolgt. Dadurch kann Lage und Höhe des Schienenmesswagens bestimmt werden. Zusätzlich ist der Schienenmesswagen mit Neigungssensoren ausgestattet mit denen mögliche Schienenneigungen detektiert werden können (NEUMANN & DENNIG 2011). Dieses Messprinzip bzw. -verfahren kann als aktueller Standard bei der Kranbahnschienenvermessung betrachtet werden (vgl. auch Abb. 3).

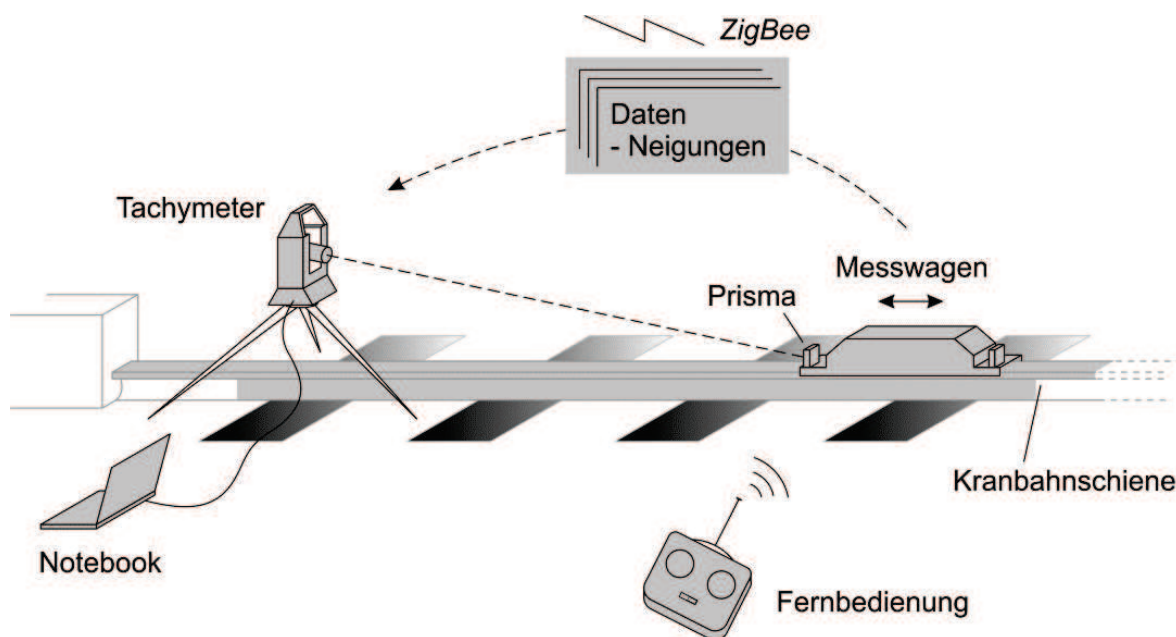


Abb. 3: Standardkonfiguration bei der Vermessung von Führungs-, Fahr- und Leitschienen (NEUMANN & DENNIG 2011)

Seit Anfang 2010 bietet die finnische Firma Konecranes das System RailQ zur Vermessung der Lage und Höhe der Kranbahnschienen nach ähnlichem Prinzip wie das System RailControl der ThyssenKrupp GfT Gleistechnik an (KONECRANES 2017). Es ist Mangels Offenlegung von Details nicht bekannt, wie der Stand der Technik im Detail ist.

Tabelle 1: Gegenüberstellung bestehender Systeme und der Neuentwicklung ARTIS

Spezifikation	RailControl	HPM (RailRob)	Konecranes (RailQ)	DEMAG	ARTIS
Automatisierungsgrad von Messung und Auswertung	autom. Messung, getrennte halbautom. Auswertung	autom. Messung, weitestgehend manuelle Auswertung	autom. Messung, Auswertung unbekannt	autom. Messung, Auswertung unbekannt	hohe integrierte autom. Messung und Auswertung
Art der Messung	kinematisch	kinematisch	kinematisch	Stop and Go	Stop and Go und kinematisch
Unabhängig von Schwingungen der Schiene?	NEIN (Tachymeter ist beeinflusst)	NEIN (Tachymeter ist beeinflusst)	NEIN (Tachymeter ist beeinflusst)	NEIN	JA
Flexibilität für verschiedene Schienenkopfbreiten	JA	JA	JA	JA	JA
Genauigkeit der Lage und Höhe (bis max. 50 m, 1 σ)	ca. 1-2 mm	keine Angabe, (fehlender Neigungsmesser => schlechtere Genauigkeit)	ca. 1-2 mm	keine Angabe	0.5 mm (auch kinematisch)
Geschwindigkeit des Messwagens	bis 60 m/min	Schrittgeschwindigkeit	15 m/min	Stop and Go	mind. 30-60 m/min
Punktdichte für die Schienenlage (bei 1 m/s)	≥ 10 cm	vergleichbar mit RailQ und RailControl, Verwendung Lasertracker denkbar	10 cm	nicht bestimmbar, da Stop and Go	1 cm und bis zu 1 mm
Exzentrische Messungen	bedingt (mit Genauigkeitsverlust)	bedingt (mit Genauigkeitsverlust)	bedingt (mit Genauigkeitsverlust)	NEIN	JA (kein signifikanter Genauigkeitsverlust) mit Lasertracker
Messung im unbelasteten Zustand	JA	JA	JA	JA	JA
Messung im belasteten Zustand	JA	JA	NEIN	NEIN	JA
Geometrische Dokumentation des Schienenkopfes	NEIN	NEIN (nur Video)	NEIN	NEIN	JA
Absturzsicherheit (Mechanisch / Software)	NEIN/NEIN	NEIN/NEIN	NEIN/JA	NEIN/JA	NEIN/JA
Dokumentation der Schienenbefestigung	NEIN	NEIN (nur Video)	NEIN	NEIN	JA

Die Firma HPM bietet das System RailRob an, welches von der Funktionsweise mit RailQ und RailControl zu vergleichen ist. Allerdings ist der Gleismesswagen nach aktuellem Stand der Autoren nicht mit Inklinometern dafür aber mit Videokamera ausgestattet. Auch bei diesem System ist mangels Offenlegung von Details nicht bekannt, wie der Stand der Technik im Detail ist. Laut Werbeinformationen (HPM VERMESSUNG 2017) ist zu vermuten, dass die Aufnahme des Gleismesswagens sowohl mit einem Tachymeter und ggf. auch mit einem Lasertracker möglich ist.

Es kann im Bereich der Kranbahnen festgehalten werden, dass zwar automatisierte Schienenmesswagen bzw. Messsysteme existieren, diese jedoch nicht die relevanten Zielgrößen für eine objektive Prüfung der Schienenachse erfassen. Insbesondere erfolgt keine geometrische Erfassung der Schienengeometrie und der Schienenbefestigungen selber, wie es für die Beurteilung der Stand- und Betriebssicherheit zwingend notwendig ist. Des Weiteren erfolgt keine durchgreifende und kontinuierliche Rekonstruktion der theoretischen Schienenachse, um die Reproduzierbarkeit der Messungen bei verschiedenen Abnutzungsgraden zu gewährleisten.

3 Das Advanced RailTrack Inspection System (ARTIS)

Mit der Entwicklung von ARTIS sollte ein Messsystem und -verfahren zur kinematischen Positionierung und Echtzeitauswertung eines selbstfahrenden Schienenmesswagens für die Vermessung von Führungs-, Leit- und Fahrschienen im belasteten und unbelasteten Zustand entwickelt werden. Dabei handelt es sich um Schienen für Kranbahnen, Roboter und tlw. auch Fertigungsstraßen und Förderbänder, deren Schienen nur einzeln befahren werden bzw. zu befahren sind. Im Folgenden wird dafür zunächst das Gesamtkonzept des Systems vorgestellt und darauf aufbauend die Zielgrößen und deren Qualität beurteilt. Im Rahmen der Qualitätsbeurteilung wird auch auf die Anforderungen an ARTIS eingegangen.

3.1 Aufbau und Sensorik

Das Messsystem ARTIS besteht aus einem selbstfahrenden Schienenmesswagen (vgl. Abb. 1) und einem externen positionsgebenden Sensor. Je nach Genauigkeitsanforderung wird ein Tachymeter (dann weitestgehend in Flucht der Schiene) oder ein Lasertracker (auch in exzentrischer Anordnung, vgl. Kapitel 3.3) für die Positionierung eingesetzt.

Das MSS wurde als modulares System mit den folgenden Sensoren ausgestattet (vgl. auch Abb. 4):

- 2 × Profillaserscanner (PLS),
- 2 × Kameras,
- 1 × Inertiale Messeinheit (IMU),
- 1 × zweiachsiges Inklinometer,
- 2 × Odometer.

Die PLS und die Kameras können modular, also in Abhängigkeit der Aufgabenstellung, auf dem Wagen montiert oder demontiert werden.

1. Bei Erfassung der Lage und Höhe der Schienenachse: Tracking des Schienenmesswagens durch ein Tachymeter oder einen Lasertracker (ohne PLS und Kameras).
2. Bei Erfassung aller relevanten Zielgrößen (vgl. Kapitel 3.2): Die Fahrzeugplattform ist mit PLS und Kameras ausgestattet. Für die Georeferenzierung aller Messpunkte wird der Wagen durch ein Tachymeter oder einen Lasertracker getrackt.
3. Zur Dokumentation des Zustands der Schiene, der Schienenbefestigung und der Schienenneigung: Die Fahrzeugplattform fährt mit den montierten PLS und Kameras über das Profil. Kein Einsatz von Tachymeter oder Lasertracker.

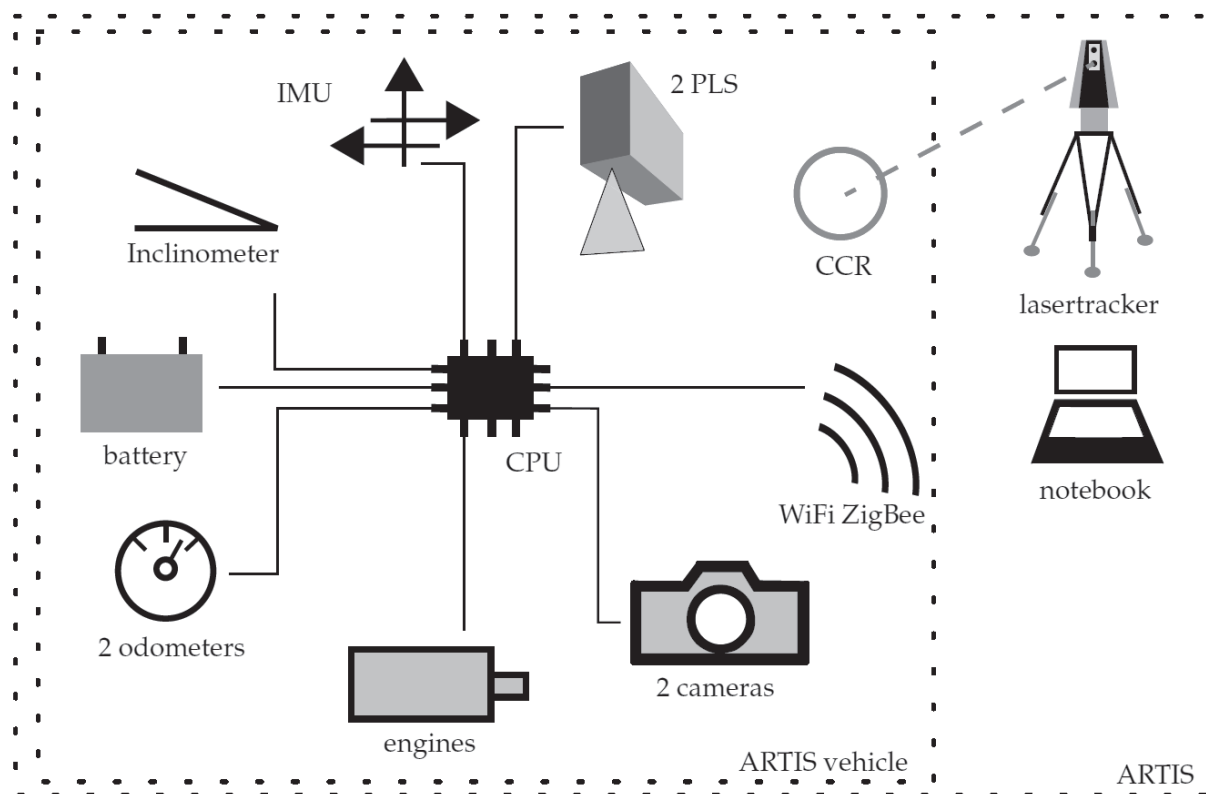


Abb. 4: Systemkomponenten von ARTIS (DENNIG et al. 2017)

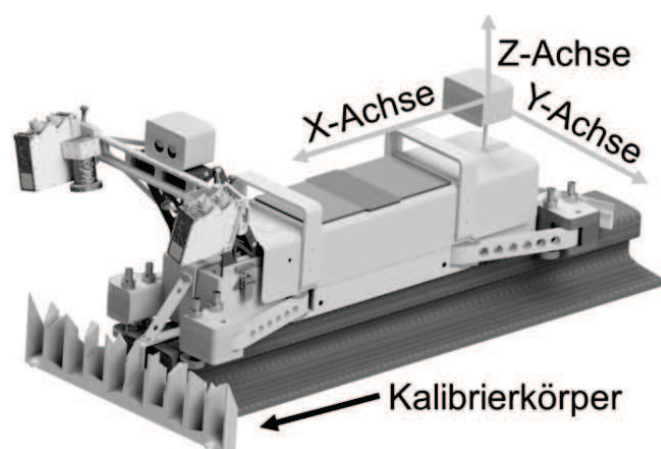


Abb. 5: Definition der Koordinatensysteme und Kalibrier Aufbau von ARTIS (DENNIG et al. 2017)

Die Anordnung der PLS und Kameras ist flexibel, sodass sie optimal auf die relevanten Bereiche (z. B. eher Schienenkopf oder Schienenfuß mit Schienenhalterungen) ausgerichtet werden können. Des Weiteren ist das Führungssystem (vgl. Abb. 1) flexibel und motorisch automatisch an Schienenkopfbreiten zwischen 20 bis 300 mm anpassbar. Für einen hohen Automatisierungsgrad wird die Anordnung für die PLS und die Kameras automatisch mittels eines Kalibrierkörpers bestimmt (vgl. Abb. 5). Weitere Details zur Kalibrierung können in DENNIG et al. (2017) sowie STRÜBING & NEUMANN (2013) nachgelesen werden.

3.2 Zielgrößen der Messung

Bei den Zielgrößen der Vermessung soll zwischen den klassischen Größen und den durch ARTIS neu zu erfassenden Kenngrößen unterschieden werden. Als klassische Zielgrößen können die bereits in der Richtlinie VDI 3576 definierten Kenngrößen angesehen werden. Hierbei handelt es sich um:

- Schienenlage und -höhe,
- Stichmaße zur lokalen Beurteilung der Schienenlage und -höhe,
- Spurweite (Spurmittenmaß),
- Längs- und Querneigung der Einzelschienen,
- Höhenunterschied der beiden Schienen zueinander,
- Schränkung der beiden Schienen zueinander.

Die metrischen Kenngrößen sollen im sub-mm Bereich (einfache Standardabweichung) erfasst werden können. Eine Genauigkeitsabschätzung hierfür wird in Kapitel 3.3 durchgeführt. Maße der inneren Geometrie, wie z. B. Stichmaße können entsprechend präziser erfasst werden, da hier die Präzision des Messverfahrens von entscheidender Bedeutung ist.

ARTIS ermöglicht über die klassischen Kenngrößen hinaus die Erfassung des Verschleißes des Schienenprofils (z. B. EDEL 2000), die Detektion von Schienenstößen sowie die Detektion und Beurteilung der Schienenbefestigungen. Diese Zielgrößen sollen mit einer Präzision (einfache Standardabweichung der inneren Geometrie) im Bereich von 0,1 mm bestimmt werden. Die Genauigkeit der Einmessung ist vergleichbar mit der Schienenlage und -höhe.

Die Profillaserscanner dienen der Erfassung des Profils (vgl. Abb. 6), der Stöße und der Schienenbefestigungen. Die Aufnahmen der Kameras dokumentieren in Verbindung mit den Daten der PLS den Ist-Zustand des Profils, der Stöße und der Schienenbefestigungen. Die IMU hat in Verbindung mit den PLS und Kamerabildern unter anderem die Aufgabe die Position von Schienenstößen zu detektieren. Das Inklinometer erfasst die Schienenneigung in Längs- und Querrichtung und korrigiert die Querneigung des angezielten Prismas. Die beiden Odometer dienen zur Erfassung der zurückgelegten Strecke, wenn die Konfiguration 3 gemäß Kapitel 3.1 angewandt wird und kein positionsgebender Sensor eingesetzt wird.

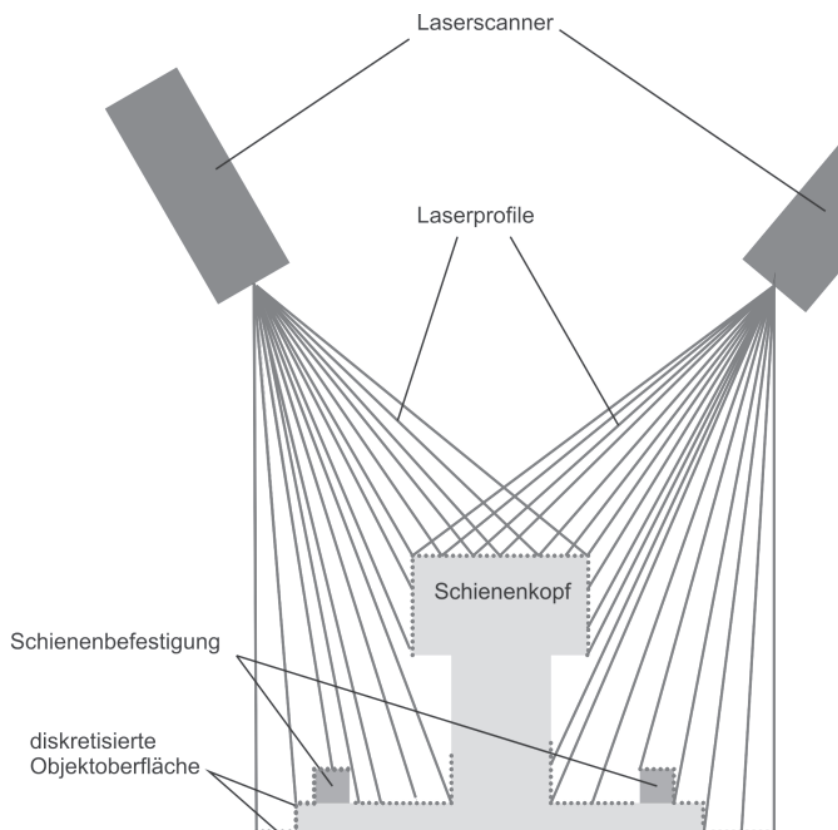


Abb. 6:
Erfassung des
Schienenprofils und
der Schienenbefesti-
gungen mittels der
Profillaserscanner

3.3 Qualität ausgewählter Zielgrößen

Die Qualität der bestimmten Zielgrößen soll exemplarisch anhand der Lage und Höhe der Schienenachse gezeigt werden. Hierfür wird ein exzentrischer Aufbau des Lasertrackers gewählt (Abb. 7), da dies einen besonders relevanten Fall darstellt. Diese Konfiguration hat zwei Vorteile und zwar, dass der Lasertracker im deformations- und vibrationsfreien Umfeld aufgestellt werden kann und dass der Nutzer sich während der Messung nicht der Absturzgefahr aussetzen muss. Darüber hinaus kann weitestgehend auf den teuren Einsatz von Hubsteigern verzichtet werden.

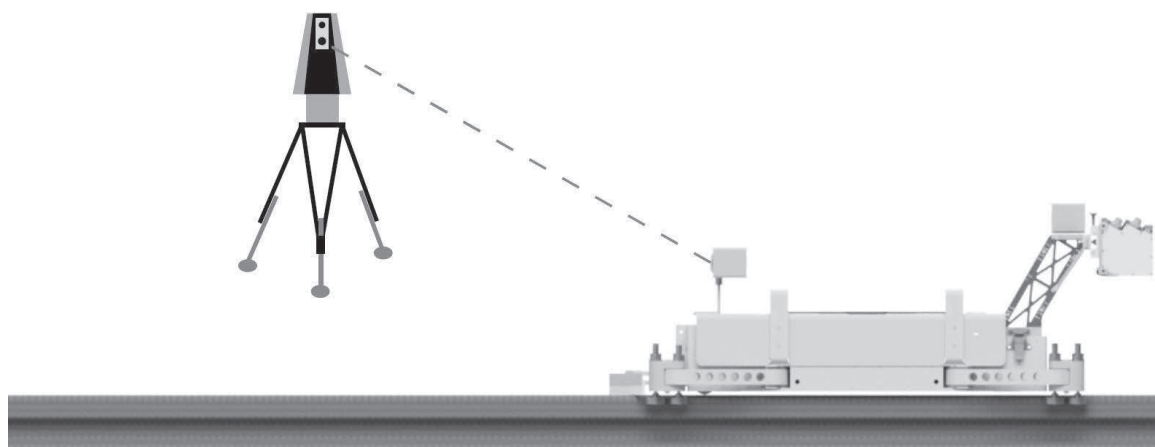


Abb. 7: Schematischer Aufbau von einem Lasertracker und dem Schienenmesswagen (DENNIG et al. 2017)

Im konkreten Fall werden die Messunsicherheiten für einen 150 m langen Schienenstrang gemäß DENNIG et al. (2017) berechnet und angegeben. Das Lasertracker ist hierbei ca. 20 m von der Schiene entfernt und befindet sich bei der Stationierung 50 m (vgl. Abb. 8). Der Höhenunterschied zwischen Lasertracker und Schiene beträgt 1,5 m, wobei ein größerer Höhenunterschied (z. B. bei der Messung eines Hallenkranes) keine signifikanten Auswirkungen auf die erzielten Genauigkeiten hat, die in Abbildung 8 angegeben sind.

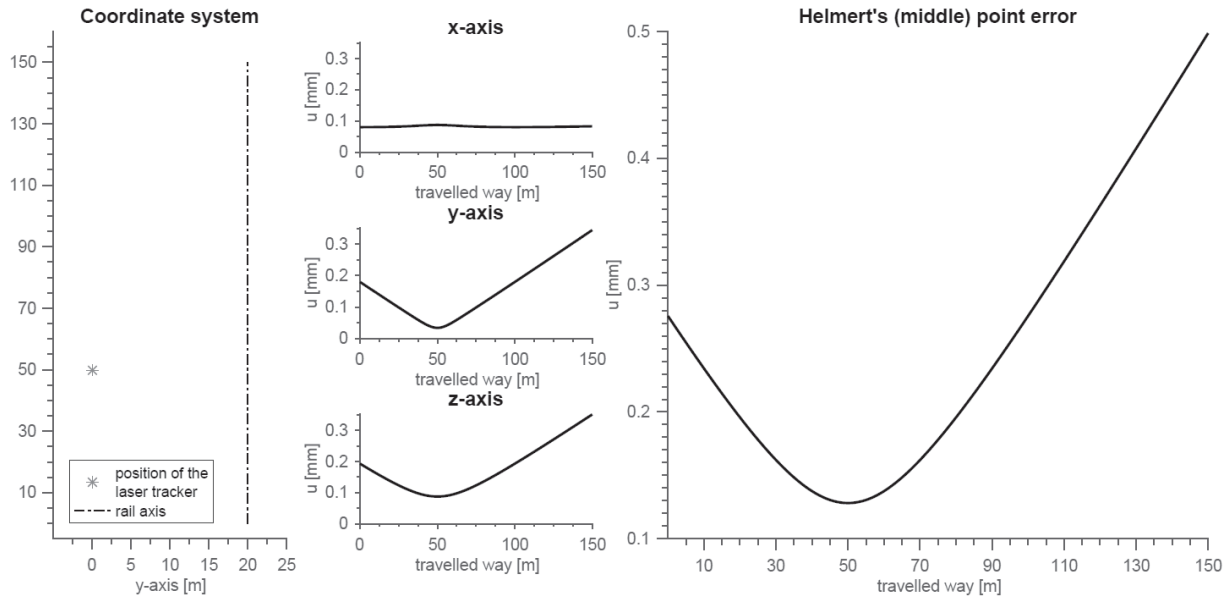


Abb. 8: Messunsicherheit der Schienenachse für jede Stationierung (DENNIG et al. 2017)

Als quantitativer Parameter für die Genauigkeit wird die einfache Messunsicherheit u der einzelnen Koordinatenkomponenten in X, Y und Z für die Schiene angegeben (Abb. 8, Mitte). Das dafür relevante Koordinatensystem ist in Abbildung 5 definiert. Des Weiteren wird aus den Unsicherheiten der einzelnen Koordinatenkomponenten der resultierende 3D-Punktfehler nach Helmert berechnet: $u_p = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}$ (Abb. 8, rechts). Die Berechnungen wurden gemäß des GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements, ISO/IEC GUIDE 98) durchgeführt. Hierbei flossen als Typ A und Typ B Unsicherheiten alle signifikanten Einflussfaktoren, von der Stationierung des Lasertrackers im Festpunktfeld, über die Positionierung des Schienenmesswagens bis hin zu Antastabweichungen der Schiene, mit in das Unsicherheitsbudget ein. Es zeigt sich, dass über eine Messentfernung von ca. 100 m somit eine erweiterte Messunsicherheit U (mit $k = 2$) von ca. 1 mm für den 3D-Punktfehler nach Helmert eingehalten werden kann ($U_p = k u_p$). Somit ist ARTIS das einzige Messsystem, das die Genauigkeitsklasse 1 der VDI 3576 erfüllen kann. Weitere Details zur Berechnung und Qualitätsmaße für die Erfassung von Schienenfehlern können in DENNIG et al. (2017) nachgelesen werden.

4 Modellierung der Schienenachse und -geometrie

Sowohl die Schienenachse als auch die Geometrie der Schiene mit ihren Schienenfehlern selber sind als kontinuierliche Objekte zu modellieren. Hierfür bieten sich Freiformkurven und -flächen an, da sie sich flexibel an die lokalen Gegebenheiten anpassen lassen. Ein genereller Überblick über diese Art der Modellierung kann in BUREICK et al. (2016b) nachgelesen werden. Die besondere Stärke der Freiformkurven und -flächen liegt in der flexiblen Anpassung des Modellierungsgrades in Abhängigkeit der Deformationen der Schienenachse und der Größe und Häufigkeit der Schienenfehler. Im Folgenden können nur ein paar ausgewählte Beispiele gezeigt werden. Weitere Beispiele für Kranbahnschienen finden sich in GOLNIK (2016) und RABENSTEIN (2015).

4.1 Modellierung der Schienenachse

Im ersten Schritt wird die Trajektorie des Schienenmesswagens mittels eines robusten Glättungsansatzes aus den Tachymeter- bzw. Lasertrackermessungen sowie den Zusatzsensoren bestimmt und somit über die 6 Freiheitsgrade der Plattform verfügt. In einem zweiten Schritt erfolgt die Berechnung der Schienenachse und der 3D-Punktwolke für den Schienenkopf und die Schienenbefestigungen. Die Schienenachse wird hierbei mittels eines robusten B-Spline Algorithmus‘ nach BUREICK et al. (2016a) berechnet. Dies ist insbesondere bei Verwendung von Tachymetern von Vorteil, da diese im Vergleich zum Lasertracker ein höheres Messrauschen als auch eine größere Anzahl an Ausreißern bei der Messung aufweisen. Durch den B-Spline-Ansatz lässt sich sowohl das Messrauschen signifikant reduzieren, als auch der Einfluss von Ausreißern weitestgehend eliminieren.

4.2 Modellierung von Schienenfehlern

Neben der Ausgabe einer reinen 3D-Punktwolke ist es zudem möglich, die erfassten Punkte der Schiene durch Freiformflächen, hier B-Splines, zu approximieren. Um die Herausforderung der Schienenapproximation (hohe Komplexität, Datenlücken, ggf. Ausreißer etc.) zu bewältigen, wird auch hier die robuste Methode zur B-Spline-Approximation nach BUREICK et al. (2016a) verwendet. In Abbildung 9 ist der gesamte modellierte Schienenkopf mit einem typischen Schienenfehler (Eindrückung) dargestellt und Abbildung 10 zeigt einen Detailausschnitt des Bereiches. Hierbei ist zu beachten, dass die Koordinatenachsen in Abbildung 9 vertauscht sind. Durch Export der approximierenden B-Spline-Fläche in ein geeignetes Format (z. B. IGES) können diese dem Kunden zur Darstellung in einem CAD-System zur Verfügung gestellt werden.

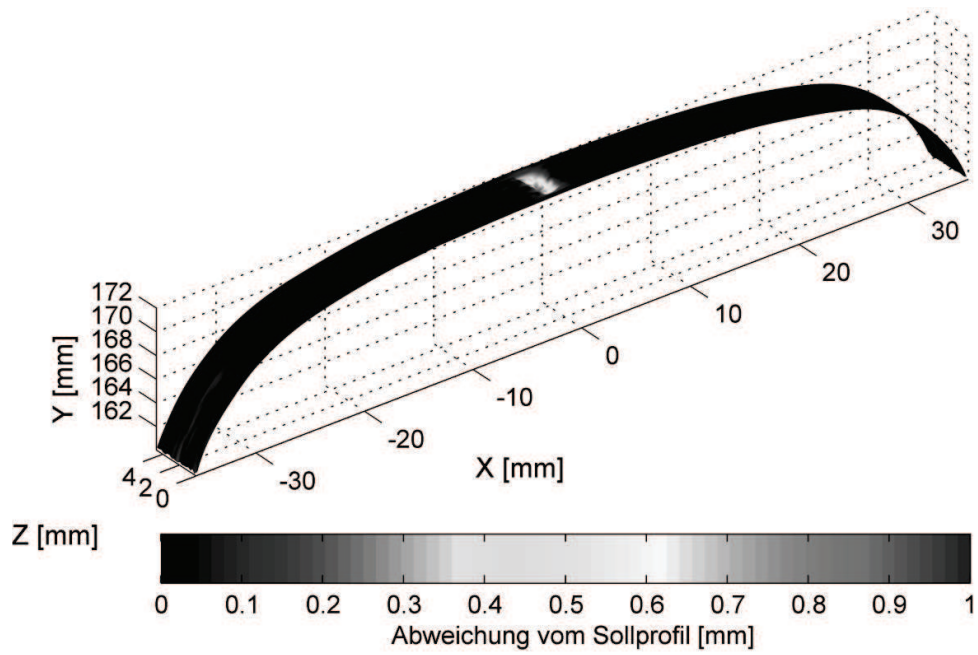


Abb. 9: Modellierter Schienenfehler im Bereich eines Schienenkopfes (GOLNIK 2016)

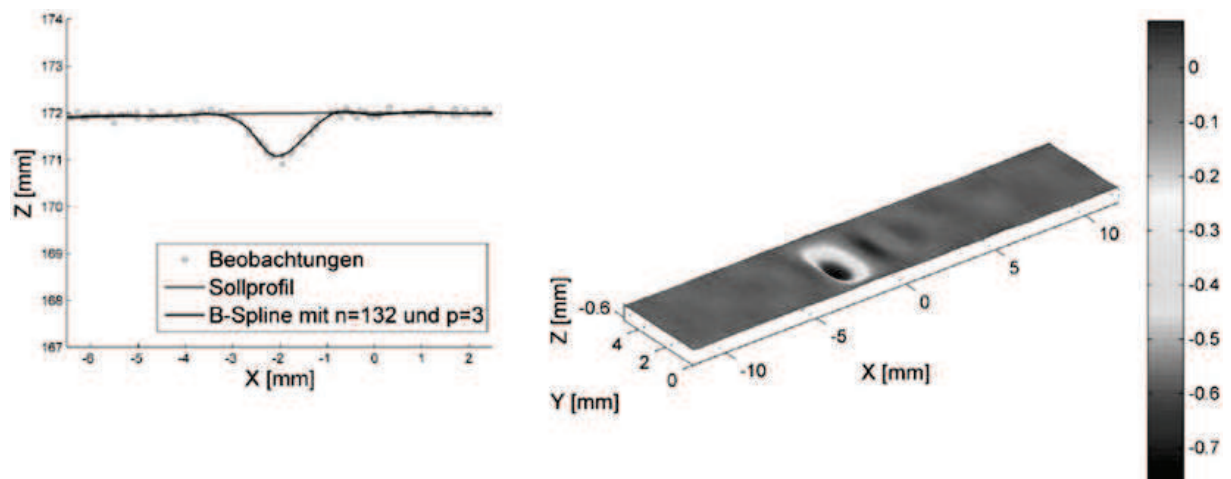


Abb. 10: Robuste B-Spline-Approximation einer Schiene mit Eindrückung nach RABENSTEIN (2015)

Förderung und Partner

Die Ergebnisse dieses Beitrags entstanden durch ein von der AIF, als Projektträger des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), gefördertes Kooperationsprojekt zwischen dem Vermessungsbüro Dr. Hesse und Partner Ingenieure (dhp:i) und dem Geodätischen Institut der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (GIH).



Literatur

- BAUMANN, W. (2004): Full-Service aus einer Hand – Messtechnik zur Krananlagen-Prüfung. In: Hebezeuge und Fördermittel, 44 (5), S. 256-259.
- BUREICK, J., ALKHATIB, H. & NEUMANN, I. (2016a): Robust Spatial Approximation of Laser Scanner Point Clouds by Means of Free-form Curve Approaches in Deformation Analysis. In: Journal of Applied Geodesy, 10 (1), S. 27-35.
- BUREICK, J., NEUNER, H., HARMENING, C. & NEUMANN, I. (2016b): Curve- and surface-approximation of 3D-point clouds. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 123 (11-12), S. 315-327.
- DENNIG, D., BUREICK, J., LINK, J., DIENER, D., HESSE, C. & NEUMANN, I. (2017): Comprehensive and highly accurate measurements of crane runways, profiles and fastenings. Submitted to Sensors.
- EDEL, K.-O. (Hrsg.) (2000): Internationales Symposium „Schienenfehler“. Interdisziplinärer Forschungsverbund Bahntechnik, Fachhochschule Brandenburg, Technische Universität Berlin. 1. Auflage.
- GOECKE GMBH & CO. KG (2017): <http://goecke.de/Products/Railway-survey-equipment/Universal-prisms-for-railway-surveying/Magnetic-track-measuring-angle.html?XTCSid=25cbf3d91d94b41f1f017f118ea16f0e> (01.03.2017).
- GOLNIK, D. (2016): Bayessche Schätzung von B-Spline-Kurven. Masterarbeit (unveröffentlicht), Geodätisches Institut der Leibniz Universität Hannover.
- HPM VERMESSUNG (2017): <http://www.hpm-vermessung.de/kranbahn-roboter/> (01.03.2017).
- ISO 8306 (1985): Cranes – Overhead travelling cranes and portal bridge cranes – Tolerances for cranes and tracks. Zurückgezogene ISO-Norm.
- ISO 12488 (2012): ISO 12488-1 Cranes – Tolerances for wheels and travel and traversing tracks – Part 1: General. ISO-Norm.
- ISO/IEC GUIDE 98: Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM, 1995).
- KONECRANES (2017): <http://www.konecranes.de/service/beratende-dienstleistungen/kranbahnvermessung-railqtm> (01.03.2017).

- MARJETIČ, A., KREGAR, K., AMBROŽIČ, T. & KOGOJ, D. (2012): An Alternative Approach to Control Measurements of Crane Rails. In: *Sensors*, 12 (12), S. 5906-5918.
- MÖSER, M. (2016): Krane und Kranbahnen. In: Möser, M. (Hrsg.): *Handbuch Ingenieurgeodäsie – Ingenieurbau*. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach, S. 169-188.
- NEUMANN, I. & DENNIG, D. (2011): Development of the kinematic Crane-Track-Surveying-System „RailControl“ – Reducing Operational Interruption of Crane Tracks. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, 5/2011, S. 162-169.
- RABENSTEIN, F. (2015): Räumliche Approximation von 3D-Punktwolken mittels robuster Freiformflächen. Masterarbeit (unveröffentlicht). Geodätisches Institut der Leibniz Universität Hannover.
- STRÜBING, T. & NEUMANN, I. (2013): Positions- und Orientierungsschätzung von LIDAR-Sensoren auf Multisensorplattformen. In: *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landsmanagement (zfv)*, 3/2013, S. 210-221.
- VDI 3576: Schienen für Krananlagen – Schienenverbindungen, Schienenlagerungen, Schienenbefestigungen, Toleranzen für Kranbahnen. Stand: 2011. Beuth, Berlin.