

## **Routenzüge indoor-lokalisiert**

Technologien, Funktionen und Anwendungsbeispiele im Überblick

**Fabian Hormes,**

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml),  
Technische Universität München

**Johannes Fottner,**

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml),  
Technische Universität München

**Lokalisierungstechnologien sind vielfältig einsetzbar. Im Beitrag wird die Konzeption für ein reales Routenzugsystem vorgestellt. Das in die Praxis eingeführte Lokalisierungssystem auf der Basis von Ultrabreitband (UWB) ermöglicht eine Analyse der Materialflüsse in Echtzeit.**

Einige Grundlagen seien vorangestellt: Unter Lokalisierung wird die Beschreibung der physischen Position eines Objekts im Raum mit Hilfe eindeutiger Koordinaten verstanden. Die Informationen zur Position des Objekts können dabei durch zusätzliche Informationen, z. B. zur Orientierung, Zeit und Geschwindigkeit, ergänzt werden [1, 2]. Grundsätzlich bestehen Lokalisierungssysteme aus vier technischen Elementen: Tag, Location Sensor, Location Engine und Location Application [1, 3, 4]. Tags kennzeichnen Referenzpunkte oder beschreiben die Identität zu lokalisierender Objekte. Als Tags können sowohl künstlich angebrachte Marker oder natürliche Landmarken als auch passive oder aktive Transponder dienen. Der Location Sensor steht in Verbindung mit dem Tag und bestimmt die benötigte Messgröße. Die Messgröße wird von der Location Engine zur Positionsberechnung verwendet. Die Location Application stellt die Schnittstelle zum Anwender dar. Während im Außenbereich (outdoor) z. B. das Global Positioning System (GPS) zur Lokalisierung verwendet werden kann, muss im Innenbereich (indoor) im Normalfall auf andere Lösungen zurückgegriffen werden [5].

### **Funktionen von Lokalisierungssystemen in Routenzugsystemen**

Die Funktionen von Lokalisierungssystemen sind vielfältig. Beim Einsatz in Flurförderzeugen können die Systeme mit Hinblick auf den Assistenzgrad in drei Stufen – Information, Anweisung/Führung sowie Stabilisierung/Eingriff – unterteilt werden [1, 6]. Dabei steigen mit zunehmendem Assistenzgrad die Anforderungen an das Lokalisierungssystem bezüglich Genauigkeit und Echtzeitfähigkeit. Motivation für den Einsatz können die Steigerung der Prozesseffizienz oder die Erhöhung der Arbeitssicherheit sein. Bild 1 zeigt beispielhaft mögliche Funktionen von Lokalisierungssystemen in Routenzugsystemen. Mit Hilfe der Positionsdaten können die Materialflüsse in Routenzugsystemen analysiert sowie auf Schwachstellen im Prozess und im Layout untersucht werden. Das Speichern von Daten zu Objektidentitäten, Positionen und Zeiten ermöglicht eine Rückverfolgbarkeit (Tracking & Tracing) und damit eine höhere Prozesstransparenz und Lieferqualität. In Transportleitsystemen können die Positionsdaten zur dynamischen Disposition von Transportaufträgen auf Basis der aktuellen Position sowie zur dynamischen Navigation zum nächsten Anlieferort genutzt werden [7]. In Verbindung mit dem zugehörigen Transportauftrag ist zudem eine automatische Buchung von Materialbeständen möglich. Dafür werden an bestimmten Punkten im Prozess virtuelle Begrenzungen, sog. Geofences, definiert, die bei

Überschreitung automatisch eine bestimmte Aktion auslösen. So lässt sich beim Verlassen eines Lagerbereichs oder beim Erreichen eines Produktionsbereichs eine automatische Umbuchung des Systembestands durchführen, wodurch manuelle Scanprozesse vermieden werden. Weiterhin können dem Fahrer auf Basis seiner aktuellen Position auch Gefahrenwarnungen oder Geschwindigkeitsbegrenzungen mitgeteilt werden, was zu einer Erhöhung der Arbeitssicherheit beiträgt [8]. Auch eine automatische Regulierung der Fahrgeschwindigkeit ist mit Hilfe einer geeigneten Schnittstelle zur Fahrzeugsteuerung möglich. Auf Stufe 3 ermöglichen Lokalisierungssysteme eine automatisierte Durchführung von Prozessen und der Fahrt von Routenzügen.

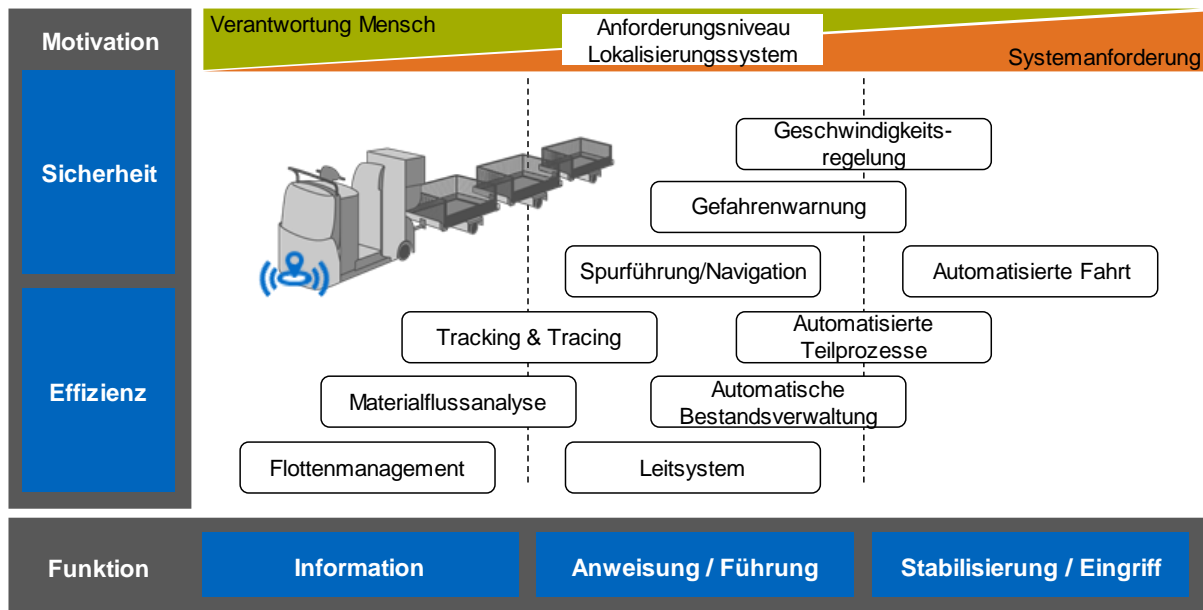


Bild 1 Funktionen von Lokalisierungssystemen in Routenzugsystemen [in Anlehnung an 1, 6]

### Lokalisierungstechnologien für den Innenbereich

Für eine Lokalisierung mit Hilfe aktiver oder passiver Transponder (Tags) können im Innenbereich Funktechnologien wie WLAN (IEEE 802.11), Bluetooth (IEEE 802.15.1), Zigbee (IEEE 802.15.4), Radio Frequency Identification (RFID), Ultrabreitband (UWB) oder Near Field Electromagnetic Ranging (NFER) eingesetzt werden. Als Messgrößen für die Lokalisierung dienen Zeiten bzw. Zeitdifferenzen, Winkel, Signalstärken oder Signalphasen. Die Position wird mit Hilfe von Laufzeitmessung, Winkelmessung oder Mustererkennung errechnet [9]. Für eine Lokalisierung mit Hilfe von Markern oder natürlichen Referenzpunkten können Kamera- oder Lasersensoren eingesetzt werden. Die Sensoren erfassen die Umgebung des Objekts und berechnen aus der zeitlichen Abfolge der Beobachtungen die relative Position zu den als Referenzpunkte dienenden Landmarken [10]. Kriterien zur Auswahl einer geeigneten Technologie können Genauigkeit, Reichweite, Energieversorgung, Energiebedarf, Infrastrukturmaßnahmen und die Kosten des Systems sein. Weitere Kriterien sind zudem die Verfügbarkeit am Markt oder der Reifegrad der Technologien [5]. Bild 2 zeigt einen Überblick und Vergleich verschiedener am Markt erhältlicher Technologien für den industriellen Einsatz auf Basis der nachfolgend beschriebenen Studien. Der Überblick dient zur allgemeinen Einordnung. Die erzielbaren Leistungen hinsichtlich Genauigkeit, Reichweite usw. können je nach Anwendungsfall variieren.







Kriterium	WLAN	Bluetooth	RFID	UWB	Kamera	Laser
Genauigkeit 	1-10 m	1-10 m	0,5-2 m	0,1-0,5 m	< 0,1 m	< 0,1 m
Reichweite 	< 50 m	< 15 m	aktiv < 50 m passiv < 2 m	< 50 m	< 50 m	< 50 m
Energieversorgung 	aktiv (Akku)	aktiv (Akku)	aktiv (Akku) passiv	aktiv (Akku)	aktiv (Netz, extern)	aktiv (Netz, extern)
Energiebedarf 	mittel	niedrig	niedrig	mittel	hoch	hoch
Infrastrukturaufwand 	hoch	hoch	hoch	hoch	mittel	mittel
Kosten mit steigender Teilnehmerzahl 	mittel	gering	gering	mittel	hoch	hoch

Bild 2 Überblick über Lokalisierungstechnologien für den Innenbereich

Der Einsatz von optischen Verfahren zur Lokalisierung über künstliche oder natürliche Landmarken mit Hilfe von Kamera- oder Lasersensoren ermöglicht eine sehr hohe Genauigkeit im Bereich weniger Zentimeter [4, 11]. Zudem ist der Infrastrukturaufwand vergleichsweise gering, besonders dann, wenn natürliche Landmarken zur Lokalisierung verwendet werden können. Die Sensoren haben jedoch einen hohen Energieverbrauch und müssen im Normalfall über das Bordnetz mit Strom versorgt werden. Außerdem fallen bei einer großen Anzahl an zu lokalisierenden Objekten hohe Kosten aufgrund der teuren Sensoren an [5]. Die Technologien zur Lokalisierung über Transponder unterscheiden sich hinsichtlich der erzielbaren Genauigkeit erheblich. Während die Lokalisierungsgenauigkeit bei WLAN und Bluetooth oft nur im Bereich mehrerer Meter liegt, ermöglichen Lokalisierungssysteme auf Basis von RFID oder UWB eine Genauigkeit unter 1 m. Bei UWB-Systemen liegt die erzielbare Genauigkeit im Normalfall sogar bei bis zu 10 cm. Die Abdeckungsreichweite der funkbasierten Verfahren ist in Gebäuden und Fabrikhallen meistens auf unter 50 m begrenzt. Bei Bluetooth und passiven RFID-Tags liegt die Reichweite deutlich niedriger. Vorteile im Vergleich zu optischen Verfahren bestehen im niedrigen bis mittleren Energiebedarf, der auch eine Energieversorgung über integrierte Akkus ermöglicht. Durch die geringen Kosten je Funk-Tag können die funkbasierten Lokalisierungssysteme gut skaliert und auch eine große Anzahl an Objekten wirtschaftlich lokalisiert werden. Die Systeme sind jedoch meist mit einem höheren Infrastrukturaufwand verbunden, da der Bereich mit Empfangsantennen (Location Sensors) ausgestattet werden muss, sofern keine Infrastruktur vorhanden ist [5, 9, 12-14].

### Echtzeit-Lokalisierung mit Ultrabreitband in einem Routenzugsystem

Zur Auswahl eines geeigneten Lokalisierungssystems können die im Bild 3 dargestellten Planungsschritte durchlaufen werden. Zunächst sind Randbedingungen zu analysieren und Projektziele zu definieren. In dem betrachteten Routenzugsystem eines Nutzfahrzeugherstellers werden große Bauteile, wie Innenverkleidungen oder Lenkräder, in Sonderladungsträgern (SLT) von einem Routenzugbahnhof zu den verschiedenen Bereitstellorten in der Montage transportiert. Für jeden SLT existiert ein passender Anhänger. Die Anhänger werden an den Bereitstellorten an- und abgekoppelt. Zur Beladung der Anhänger im Routenzugbahnhof werden Gabelstapler eingesetzt. Der Prozess basiert auf einem klassischen Behälter-Kanban-Verfahren. Es existiert keine informationstechnische Unterstützung, und es werden keinerlei Daten über den Prozess erhoben. Der Routenzugprozess stellt somit eine Art Blackbox dar, was die Planung und Optimierung des Bereichs erschwert. Daher sollen mit Hilfe eines Lokalisierungssystems wichtige Daten und Informationen über den Prozess erhoben und Materialflüsse analysiert werden.

Neben diesen funktionalen Anforderungen können folgende technische Anforderungen an das Lokalisierungssystem definiert werden:

- Einsatz in Gebäuden
- Echtzeitfähigkeit
- Genauigkeit < 1 m
- Reichweite > 15 m
- Anzahl Objekte > 50
- Niedriger Energiebedarf
- Eigene Energieversorgung.

Nach der Definition der Projektziele und der Anforderungen an das benötigte System folgt die Technologie- und Anbietersauswahl. Im betrachteten Anwendungsfall soll eine große Anzahl an Objekten, bestehend aus Gabelstaplern, Schleppfahrzeugen und Anhängern, lokalisiert werden (Bild 4). Die Anhänger verfügen über keine eigene Energieversorgung. Damit können kamera- und laserbasierte Lokalisierungssysteme ausgeschlossen werden. Weiterhin wird eine hohe Genauigkeit kleiner als 1 m gefordert, um die Materialflussprozesse und Fahrwege eindeutig rückverfolgen zu können. Daher sind auch WLAN und Bluetooth auszuschließen. Aufgrund der potenziell höheren Genauigkeit, vergleichbarer Infrastrukturmaßnahmen und der bei dieser Anzahl an Objekten nur geringfügig höheren Kosten für Tags im Vergleich zu RFID wurde im Anwendungsfall letztlich die UWB-Technologie ausgewählt. Bei der Auswahl des benötigten UWB-Lokalisierungssystems fiel die Entscheidung auf das Echtzeit-Lokalisierungssystem des Anbieters Kinexon aus München.



Bild 3 Vorgehen bei der Konzeption und Umsetzung eines Lokalisierungssystems

Nach der Technologie- und Anbietersauswahl folgte die Feinplanung des favorisierten UWB-Lokalisierungssystems. Als Untersuchungsbereich wurde der Bahnhof des Routenzugsystems gewählt, wo die Routenzüge ihre Touren starten und von Gabelstaplern be- und entladen werden. Das Lokalisierungssystem besteht aus aktiven Funk-Tags, Ankern (Empfangsantennen), dem Server zur Datenverarbeitung und einer Web-Applikation zur Visualisierung und Analyse der Daten. Für die Funkverbindung zwischen Tags und Ankern wurde das Frequenzband 3,5-4,5 GHz ausgewählt. Die Tags der Gabelstapler und Schleppfahrzeuge wurden mit einer festen Sendefrequenz von 5 Hz konfiguriert. Bei den Anhängern empfahlen sich eine niedrigere Sendefrequenz von 1 Hz und ein Ruhemodus mit 0,1 Hz, da sich die Anhänger häufig nicht in Bewegung befinden und somit Energie gespart werden kann. Für die Untersuchungen wurden acht Gabelstapler, zwölf Schleppfahrzeuge und 54 SLT-Anhänger mit Tags ausgestattet. Bei den Gabelstaplern und Schleppfahrzeugen wurden die Tags auf dem Dach montiert, um einen optimalen Sichtkontakt zu den Ankern zu ermöglichen. Bei den Anhängern wurden die Tags an den Deichseln angebracht, damit Beschädigungen beim Be- und Entladen ausgeschlossen sind. Aufgrund des Rasters der Hallensäulen und des benötigten direkten Sichtkontaktes (Line-of-sight) der Tags zu den Ankern wurden in Summe zwölf Anker an den Säulen auf einer Höhe von 5 m installiert. Die Anker werden über Power-over-Ethernet (PoE) mit dem Server und dem Stromnetz verbunden.

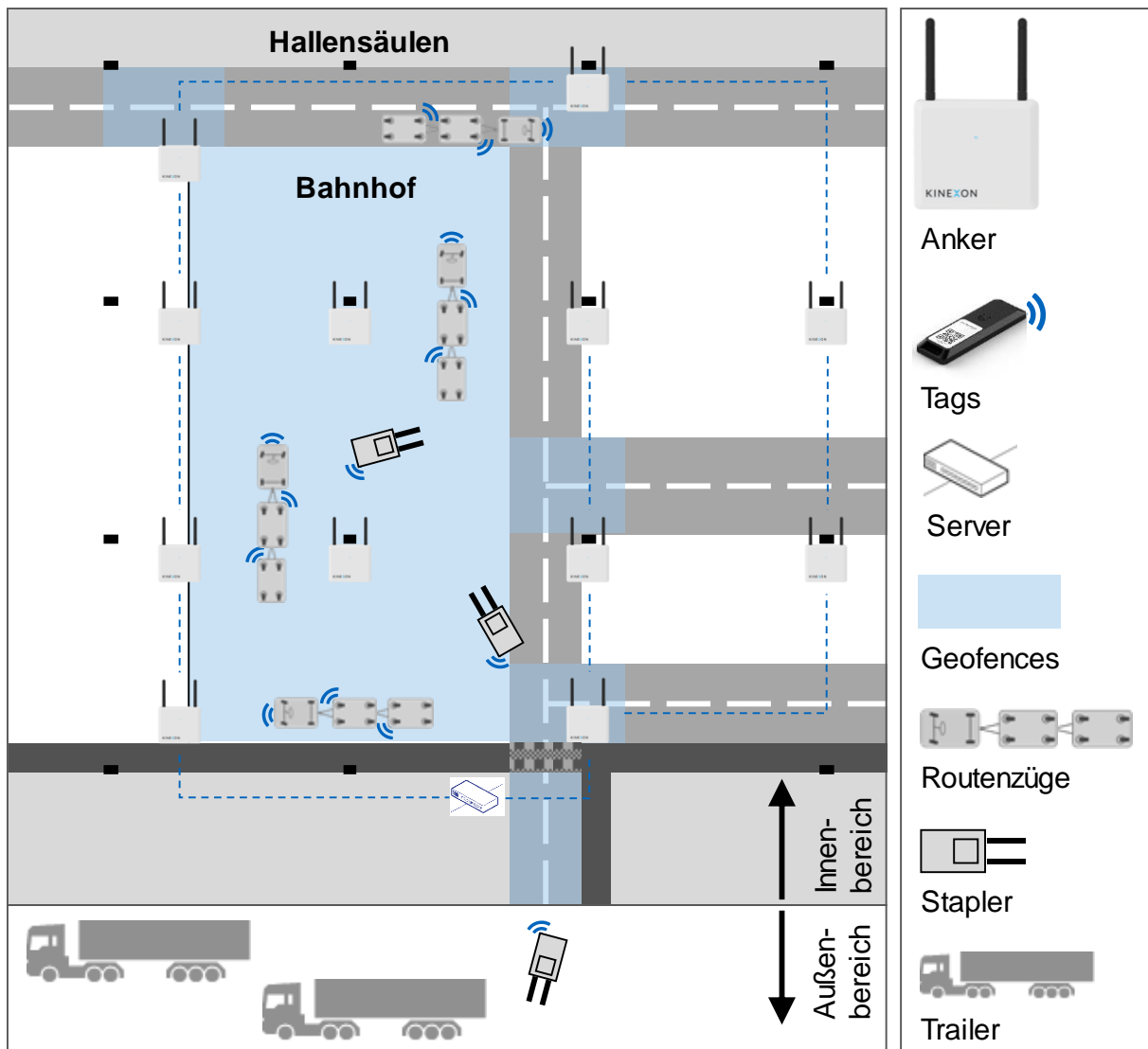


Bild 4 Detailkonzept eines UWB-Lokalisierungssystems für die Produktionsversorgung

Nach der Installation der Anker, Tags und des Servers folgte das Einmessen der Ankerpositionen. Zudem wurden Mäander-Tests durchgeführt, um die Funkabdeckung innerhalb des Untersuchungsbereichs zu überprüfen. Für eine genaue Positionsrechnung sollten je Tag-Position mehr als vier Anker beteiligt sein. Im Anschluss an die Hardware-Installation wurde zusammen mit dem Projektpartner Kinexon die Web-Applikation zur Visualisierung und Analyse der Echtzeit-Positionsdaten eingerichtet und an den Anwendungsfall angepasst. Neben der Definition der Ankerpositionen in der virtuellen Karte und der Zuordnung der Tags zu den Bauteilen wurden Geofences am Bahnhof sowie an den Ein- und Ausfahrten platziert – für die nachfolgende Analyse.

### Transparente und effiziente Produktionsversorgung durch Echtzeit-Lokalisierung

Nach Abschluss der Installation und Einrichtung des Lokalisierungssystems konnte mit der Analyse der Materialflüsse begonnen werden. Analysiert wurden Zykluszeiten, Durchsatz sowie Layout und Fahrwege. Die Zykluszeit in Routenzugsystemen  $t_{zyk}$  setzt sich zusammen aus der Fahrzeit  $t_F$ , der Haltepunktzeit  $t_H$ , der Entladezeit am Haltepunkt  $t_E$  und der Beladezeit am Bahnhof  $t_B$  [15]:

$$t_{zyk} = t_F + t_H + t_E + t_B$$

Mithilfe der definierten Geofences lassen sich die Zykluszeiten je Tour und Route aus der Zeitdifferenz zwischen zwei Einfahrten in den Bahnhof ermitteln. Zusätzlich können über die Standzeit im Bahnhof die Beladezeiten  $t_B$  der Routenzüge bestimmt werden. Für eine Ermittlung der übrigen Zeitanteile der Gesamtzykluszeit ist eine Installation entlang der gesamten Route erforderlich. Neben den Zyklus- und Beladezeiten der Routenzüge können zudem die Fahr- und Standzeiten der Gabelstapler im Bahnhof des betrachteten Systems analysiert werden. Die Auswertungen der Prozesszeiten im Anwendungsfall zeigen, dass die Fahrzeuge hohe Standzeiten im Bahnhof aufweisen, die auf eine geringe Informationsverfügbarkeit und eine fehlende Prozesssynchronisation zurückzuführen sind.

Der Ladungsträgerdurchsatz  $\lambda$  gibt an, wie viele Ladungsträger je Bauteil oder Route in einer bestimmten Zeit (Schicht, Tag usw.) im System transportiert werden [15]. Für die Durchsatzanalyse wurden die Ein- und Ausfahrten der verschiedenen Anhänger und Bauteiltypen mit Hilfe der Geofences erfasst. Die Auswertungen im Anwendungsfall zeigen, dass deutliche Durchsatzunterschiede und -schwankungen zwischen den Routen vorliegen, was auf eine ungleichmäßige Routenauslastung und eine ineffiziente Ressourcennutzung hindeutet. Die Analyse des Layouts und der Fahrwege der Fahrzeuge wird mit Hilfe der verdichteten Positionsdaten in sog. Heat Maps vorgenommen [16]. Diese Heat Maps zeigen, dass sich die Fahrwege der Gabelstapler und Routenzüge erheblich überschneiden, was zu Blockierungen und Gefahrensituationen führt. Besonders betroffen davon ist der Bereich der Hallenausfahrt der Gabelstapler, da hier auch die Routenzüge in den Bahnhof einfahren (Bild 5; s. S. 16).

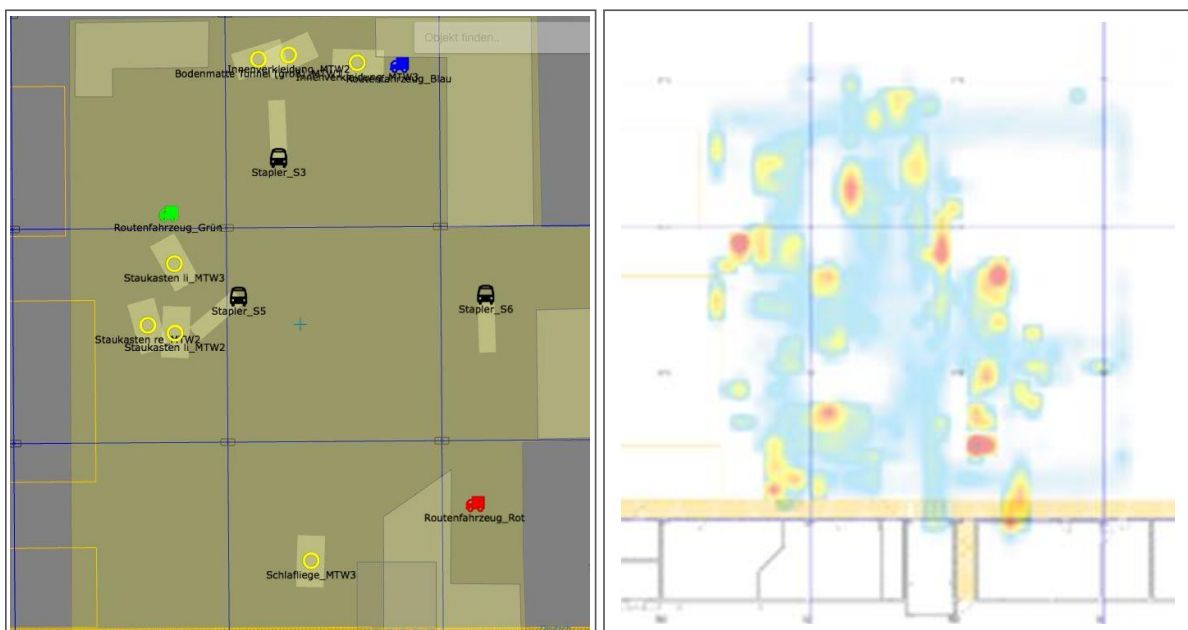


Bild 5 Visualisierung der Positionsdaten in Echtzeit (l.) und Heat-Map-Analyse der Fahrwege (r.)

### Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz von Lokalisierungssystemen in Routenzugsystemen bietet vielfältige Möglichkeiten. So können diese Systeme zur Datengenerierung und Analyse von Routenzugsystemen, zur Führung von Mitarbeitern in Form von Assistenz- bzw. Leitsystemen oder zur Automatisierung von Prozessschritten verwendet werden. Dabei kommen verschiedene Technologien zum Einsatz, die anwendungsfallspezifisch ausgewählt werden müssen. Auswahlkriterien können die Lokalisierungsgenauigkeit, die Abdeckungsreichweite oder auch die Energieversorgung sein. Im beschriebenen Anwendungsfall wurde aufgrund der hohen Anzahl an Lokalisierungsobjekten, der benötigten autarken Energieversorgung und

hoher Genauigkeitsanforderungen ein Lokalisierungssystem auf Basis der UWB-Technologie ausgewählt. Mit Hilfe des Systems konnten die Materialflüsse im betrachteten Routenzugsystem in Echtzeit analysiert und Schwachstellen im Prozess identifiziert werden. Um die Schwachstellen zu beseitigen, sollen im betrachteten System im nächsten Schritt die anfallenden Transportaufträge digitalisiert und durch ein dynamisches Leitsystem in Echtzeit disponiert werden.

## Literatur

- [1] Hohenstein, F. C.: Systementwurf und Umsetzung einer funktionsintegrierenden Gabelstaplerlokalisierung. Technische Universität München, Dissertation 2014.
- [2] Bartlett, D.: Essentials of Positioning and Location Technology. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [3] Malik, A.: RTLS for Dummies. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons 2009.
- [4] Jung M.: Entwicklung und Evaluierung einer kamerabasierten Lokalisierungsmethode für Flurförderzeuge. Technische Universität München, Dissertation 2017.
- [5] Mautz, R.: Indoor positioning technologies. Habilitationsschrift. Institute of Geodesy and Photogrammetry, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, ETH Zürich, Zürich, 2012.
- [6] Lindl, R.: Tracking von Verkehrsteilnehmern im Kontext von Multisensorsystemen. Technische Universität München, Dissertation 2009.
- [7] Hormes, F.; Lieb, C.; Fottner, J.; Günthner, W. A.: Steuerung von Routenzugsystemen. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 112 (2017) Nr. 11, S. 778–782.
- [8] Bostelman, R.: Towards improved forklift safety. In: Messina, E.; Madhavan, R. (Hrsg.): Proceedings of the 9th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems – PerMIS '09, New York, USA, 2009, S. 297-304.
- [9] Liu, H.; Darabi, H.; Banerjee, P.; Liu, J.: Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems. In: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), Jg. 37 (2007) Nr. 6, S. 1067–1080.
- [10] Martin, W.: Ubiquitous Navigation: skalierbare ortsbezogene Dienste in Gebäuden. Ludwig-Maximilians-Universität München, Dissertation 2012.
- [11] Gutmann J. S.: Robuste Navigation autonomer mobiler Systeme. Technische Universität München, Dissertation 2000.
- [12] Deak G.; Curran K.; Condell J.: A survey of active and passive indoor localisation systems. In: Computer Communications Jg. 35 (2012), Nr. 16, S. 1939-1954.
- [13] Karimi H. A.: Indoor wayfinding and navigation. Boca Raton, FL: CRC Press 2015.
- [14] Yassin A.; Nasser Y.; Awad M.; Al-Dubai A.; Liu R.; Yuen C.; Raulefs R.; Aboutanios E.: Recent advances in indoor localization: A survey on theoretical approaches and applications. In: IEEE Communications Surveys & Tutorials Jg. 19 (2016), Nr. 2: S. 1327-1346.
- [15] Verein Deutscher Ingenieure: Routenzugsysteme - Planung und Dimensionierung. VDI-Richtlinie Nr. 5586 Blatt 2, 2016.
- [16] Tomanek, D. P.; Schröder, J.: Value Added Heat Map – Eine Methode zur Visualisierung von Wertschöpfung. Wiesbaden: Springer Gabler, 2018.