

# **WACHSTUMSKERN FELDSCHWARM ABSCHLUSSBERICHT VP 3**

# UMFELDSENSORIK UND SCHWARMNAVI- GATION

Schwarmführung und Intra-Schwarmortung

**Dr. Holger Fichtl**

Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme, IVI

Projektnummer: 03WKCW3C

Datum: 18.03.2022

# Inhalt

<b>1</b>		
<b>Kurze Darstellung</b> .....		<b>4</b>
<b>2</b>		
<b>Ortung und Schwarmführung</b> .....		<b>5</b>
2.1		
Ortungssystem .....		5
2.1.1		
Funktionale Anforderungen.....		5
2.1.2		
Evaluierung von Ortungsverfahren.....		5
2.2		
Modellplattformen .....		7
2.3		
Schwarmführung.....		9
2.3.1		
Anforderungen.....		9
2.3.2		
Aufbau und Funktionsweise helyOS.....		9
2.3.3		
Missionen .....		11
2.4		
Pfadfolge-Regler .....		12
<b>3</b>		
<b>Literaturverzeichnis</b> .....		<b>14</b>

Ein Feldschwarm ist ein loser, virtueller Verband von teilautonom agierenden Feldschwarmeinheiten. Der Feldschwarm muss auf dem Feld koordiniert geführt werden. Die einzelnen Feldschwarmeinheiten müssen innerhalb des Schwarms positioniert werden. Die Bewegung der Feldschwarmeinheiten sowie die Ausführung der Arbeitsaufgabe muss überwacht werden. Diese Aufgabe übernimmt eine Schwarmführung.

Aufgabe im Teilprojekt TP3.3 war die Entwicklung eines Konzeptes zur Schwarmführung und dessen technische Umsetzung als Forschungsmuster. Für die Schwarmführung wurde eine Software entwickelt. Mit der Schwarmführung soll am Projektende ein Feldschwarm, bestehend aus zwei Feldschwarmeinheiten, geführt werden. Die Schwarmführung unterteilte sich in zwei Hauptaufgaben. Es war ein Leitstand zu entwickeln, mit dem der Einsatz eines Feldschwarms geplant und überwacht werden kann. Für die Planungsaufgabe waren geeignete Schnittstellen zur Einbindung anderer Softwareprogramme vorzusehen. Auf den Feldschwarmeinheiten sind Systeme und elektronische Steuerungen vorzusehen, die eine Kommunikation mit dem Leitstand ermöglichen sowie Daten und Informationen mit den elektronischen Steuerungen der Feldschwarmeinheiten austauschen.

Für den Leitstand und die Schwarmführung wurde ein Konzept verwendet, welches im Projekt »AutoTruck« des Fraunhofer IVI getestet wurde. [1] In diesem Projekt wurde die Umsetzbarkeit eines Leitstandes und die Steuerung eines automatisierten Lkw mittels des Leitstandes getestet.

Die Feldschwarmeinheiten müssen innerhalb eines Feldschwarms genau lokalisiert werden. Eine Teilaufgabe besteht in der Erarbeitung eines geeigneten Ortungssystems. Die Ortungsgenauigkeit sollte mindestens 10 Zentimeter erreichen. Mindestens eine Maschine muss über ein Lokalisierungssystem verfügen, welches die Position in einem globalen Koordinatensystem ermittelt.

Im Rahmen der Bearbeitung der Arbeitsinhalte des VP3 TP3.3 wurde mit den nachfolgenden Projektpartner zusammengearbeitet.

- IAV GmbH
- TU Dresden, AST – Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik
- TU Dresden, TD – Lehrstuhl für technisches Design

Im Rahmen der Entwicklung der Software für den Leitstand und die Feldschwarmeinheiten erfolgte die Zusammenarbeit Verbundprojekt übergreifend. Der Versuchsbetrieb mit der Schwarmsteuerung erfolgt im Verbundprojekt VP 4.

## 2 Ortung und Schwarmführung

### 2.1 Ortungssystem

#### 2.1.1 Funktionale Anforderungen

Als Feldschwarm wird ein Verbund von Feldschwarmeinheiten bezeichnet, der koordiniert Arbeitsaufgaben ausführt. Die Feldschwarmeinheiten können bedienerlos sein oder mit Bedienern besetzt sein.

Die Feldschwarmeinheiten müssen über ein Ortungssystem verfügen. Das Ortungssystem soll die Position der Feldschwarmeinheit innerhalb eines Schwarms ermitteln. Mindestens eine Feldschwarmeinheit muss über ein GNSS (global navigation satellite system) verfügen, um die Koordinaten in einem globalen Koordinatensystem zu ermitteln.

Die Bestimmung der relativen Position zu anderen Feldschwarmeinheiten soll mit einer Genauigkeit von 10 Zentimetern erfolgen.

#### 2.1.2 Evaluierung von Ortungsverfahren

Es sind verschiedene Ortungsverfahren bekannt. Diese unterscheiden sich bezüglich des technischen Aufwandes, der Kosten für die Empfänger und die erzielbare Genauigkeit. In Tab. 1 sind verschiedene untersuchte Ortungsverfahren aufgeführt.

Ortungsverfahren	Kurzerläuterung
GNSS Ortungsverfahren	Standardempfänger für mehrere Satellitensysteme (GNSS – global satellite navigation system) Höherwertige Empfänger (GNSS+ und GNSS++) Sensorkosten: GNSS mit ca. 100€ bis GNSS++ mit über 10T€
dGNSS Ortungsverfahren	Nutzung von Korrekturdaten einer Basisstation Eliminierung von Fehlern durch Differenzbildung gleichzeitig empfangener Signale durch Codemessungen Kosten GNSS++ Basisstation ca. 20 T€
RTK basiertes Ortungsverfahren (RTK - real time kinetic)	ähnlich dGNSS, zusätzlicher Vergleich der Trägerphase und des vom Empfänger erzeugten Referenzsignales
UWB – WSN basiertes Ortungsverfahren	Ortung innerhalb eines aufgespanntem Funknetzwerkes Funknetzwerk mit zusätzlicher Funktion der Datenübertragung (UWB - Ultra wideband; WSN wireless sensor network)

Tab. 1 Untersuchung von Ortungsverfahren

Das heutzutage häufig eingesetzte Ortungsverfahren nutzt die Signale von Satelliten. Es sind verschiedene Satellitensysteme im Einsatz, wie beispielsweise das GPS (global positioning system), Baidu oder Galileo. Die Signale der Satelliten werden von einem Empfänger ausgewertet. Je nach Bauart des Empfängers werden die Signale eines oder mehrerer Systeme für die Ermittlung der Position verwendet. Durch atmosphärische Störungen treten Verfälschungen auf, die nur eine ungenaue Positionierung mit großen Abweichungen (mehrere Meter) ermöglichen.

Dieses Ortungsverfahren kann durch Verwendung einer Referenz- oder Basisstation verbessert werden. Es wird als dGNSS (differentielles GNSS) bezeichnet. Die Positionsdaten einer mobilen Basisstation müssen genau eingemessen werden. Der GNSS-Empfänger empfängt jetzt zusätzlich Korrekturdaten von der Basisstation. Die Basisstation eliminiert Fehler und Störungen mittels Differenzbildung zwischen den eingemessenen Positionsdaten und den empfangenen Daten der Satelliten. Dieses Verfahren verbessert die Genauigkeit der Ortung auf wenige Zentimeter.

Das RTK-basierte Ortungsverfahren (RTK – real time kinetic) funktioniert in ähnlicher Weise wie das dGNSS-Verfahren. Hier werden ortsfeste Basisstationen verwendet, die in der Regel per Datendienst oder Funkübertragung die Korrekturdaten bereitstellen. RTK-Stationen werden von kommerziellen Anbietern oder von staatlichen Einrichtungen (z. B. Sapos) betrieben.

Die vorgenannten Verfahren funktionieren durch den Empfang von Satellitensignalen. Können diese Signale nicht, in unzureichender Qualität oder nicht von einer Mindestanzahl von Satelliten empfangen werden, sinkt die Ortungsgenauigkeit oder die Ortung versagt vollständig. Dies kann beispielsweise durch Abschattungen (Fahrt in einem tiefen Tal, Fahrt an einem Waldrand, Fahrt unter einem Blätterdach) oder Reflexionen (Fahrt innerhalb städtischer Bebauung) vorkommen.

Beim UWB – WSN-Ortungsverfahren können Funkempfänger für die Ortung genutzt werden. Die Funkempfänger werden für die Datenübertragung und Kommunikation genutzt. Grundsätzlich könnte dieses Ortungsverfahren auch innerhalb geschlossener Gebäude genutzt werden, da kein Empfang von Satellitensignalen notwendig ist.

Insbesondere das UWB-WSN-Ortungsverfahren ist für den Feldschwarm interessant. Es wird davon ausgegangen, dass Daten und Informationen zwischen den Feldschwarmeinheiten ausgetauscht werden. Es wurde untersucht, ob die dafür erforderlichen Funkempfänger gleichzeitig für die Ortung verwendet werden können.

Die Untersuchung der Ortungsverfahren wurde auf dem Testgelände des Fraunhofer IVI durchgeführt. Untersucht wurden GNSS, GNSS+ (zweikanalige Empfänger; zwei Satellitentypen), GNSS++ (mehrkanalig, mehr als zwei Satellitentypen) und UWB – WSN. Verfahren mit dGNSS oder RTK wurden nicht in die Untersuchung einbezogen. Von diesen Systemen ist bekannt, dass eine hohe Genauigkeit von bis zu zwei Zentimetern bei der Positionsbestimmung möglich ist.

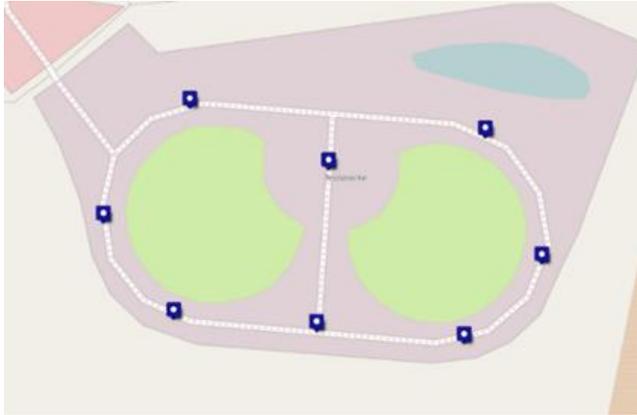
Es wurde auf dem Testgelände ein geodätisches Vermessungsnetz mit 8 Knoten angelegt. Die Genauigkeit der Einmessung der Messpunkte liegt bei weniger als 5 mm. An diesen Knoten wurden Messstation bzw. Empfänger positioniert. Die Abb. 1 zeigte einen Überblick über die gewählten Knoten.

Im Mittel wurden an den Knoten folgende Abweichungen festgestellt:

- GNSS: 2,12 m
- GNSS+ 0,95 m
- GNSS++ 0,24 m

- UWB: 0,17 m

Die GNSS-Empfänger haben eine automatische Positionsbestimmung vorgenommen. Die Messqualität mit dem UWB-Ortungsverfahren hängt hochgradig von der geodätischen Kalibrierung der infrastrukturseitigen Module ab. Diese Kalibrierung wäre auch beim Einsatz in der landwirtschaftlichen Umgebung nötig.



**Abb. 1 Knoten des geodätischen Netzes**  
Quelle: Fraunhofer IVI

Auf Basis der Untersuchungsergebnisse wurde entschieden, kein Ortungsverfahren mit UWB-WSN anzuwenden. Gründe dafür sind:

- Für eine hohe Genauigkeit der Ortung ist ein dichtes geodätisches Netz mit vielen Knoten notwendig
- Die Knoten des Netzes müssen genau eingemessen werden
- Die Sendereichweite beträgt nur 100 Meter im Freifeld

Aus diesem Grund wurde entschieden, für die Maschine FSE II ein GNSS mit RTK-Korrektur eines kommerziellen Systemlieferanten zu verwenden. Für die RTK-Korrektur wurde Sapos-Dienst verwendet, welcher im Bundesland Sachsen flächendeckend und kostenfrei verfügbar ist. Der GNSS-Empfänger ist mit zwei Antennen verbunden, so dass neben der Position auch die Ausrichtung der Maschine im Koordinatensystem berechnet wird. Aus Anwendersicht ergibt sich eine robuste Lokalisierung. Nachteilig sind die Gesamtkosten (GNSS-Empfänger mit Auswertung, 2 Stück Antennen, Modem für Datenaustausch zum RTK-Dienst) von ca. 10T€.

## 2.2

### Modellplattformen

Zum Testen von Schwarmmanövern oder anderen Funktionen der Feldschwarmeinheiten wurden Modell-Versuchsplattformen aufgebaut. Mit diesen Modellplattformen sollten frühzeitig Versuche durchgeführt werden können. Die Größe der Modellplattformen sollte einen gefahrfreien Betrieb auf dem Testgelände des Fraunhofer IVI ermöglichen.

Die Plattformen bestehen aus zwei Grundrahmen, die mit einem Drehgelenk miteinander verbunden sind. Die Grundrahmen wurden aus Aluminium-Profilen aufgebaut. Es werden insgesamt vier Stück baugleiche Radträger verwendet. An den Radträgern ist ein elektrisch angetriebenes Gummi bereiftes Rad vorhanden. Die Radträger sind mit einem elektrischen Antrieb lenkbar. Die Energieversorgung erfolgt mit Li-Ionen-Akkus aus dem Modellbau.

Die Abb. 2 zeigt eine der insgesamt drei baugleichen Modellplattformen.

Die Modellplattformen wurden mit elektronischen Steuerungen des Typs Raspery Pi 3 ausgestattet. Jeder der insgesamt 8 Elektromotoren (4 Stück für den Radantrieb, 4 Stück für die Lenkung) verfügt über eine eigene Steuereinheit. Die Steuereinheiten sind miteinander mit einem Bussystem verbunden. Die Modellplattformen wurden aufgebaut und in Betrieb genommen.

Mit den Modellplattformen wurden Untersuchungen mit Ortungsmodulen der Firma ArduSimple durchgeführt. Hier leisteten die Modellplattformen gute Dienste. Weiterhin dienten sie der Erprobung von Lenkmanövern und einem Algorithmus zur Pfadfolgeregelung.



**Abb. 2 Modellplattform**  
Quelle: Fraunhofer IVI

Nachteilig bei diesen Entwicklungsschritten war die Verwendung der Raspery Pi. Üblicherweise werden am Fraunhofer IVI für Versuchsfahrzeuge Steuergeräte der Firma STW verwendet. Die Programmierung und die zu erstellenden Software muss auf das zu verwendende Steuergerät angepasst werden. Die Unterschiede zwischen beiden Steuergerätetypen sind sehr groß. Software, welche für den Raspery Pi entwickelt wurde, kann nur mit hohem Überarbeitungsaufwand auf einem STW-Steuergerät implementiert werden. Eine Weiterverwendbarkeit oder Übertragbarkeit von Software oder von Teilen von Software ist kaum gegeben. Die technische Ausführung der Hauptfunktionen (Fahren, Lenken) der Modellplattform unterscheidet sich vollständig von den Feldschwarmeinheiten. Die Erkenntnisse, welche bei der Inbetriebsetzung der Modellplattformen gewonnen werden konnten, sind daher nicht auf die Feldschwarmeinheiten übertragbar.

Für die weitere Entwicklungsarbeiten wurden die Modellplattformen nicht weiterverwendet. Der Aufwand für die notwendige Überarbeitung wurde als zu hoch eingeschätzt. Dennoch haben die Modellplattformen zu einem Erkenntnisgewinn beigetragen. Derzeit werden die Modellplattform in einem weiterführenden Projekt genutzt, um auf Basis von STW-Steuergeräten eine neue Version des ROS (robot operating system) zu erproben.

## 2.3 Schwarmführung

### 2.3.1 Anforderungen

In einem Feldschwarm sollen bedienergeführte Maschinen gemeinsam mit teilautonomen Maschinen eine gemeinsame Arbeitsaufgabe erledigen. Alle Maschinen eines Schwarms müssen dem Schwarm zugeordnet und ihre Fahrbewegungen und Fahrtrou-ten koordiniert werden.

Der ursprüngliche Ansatz zur Führung eines Feldschwarms sah vor, dass die teilauto-nomen Maschinen sich in einer festlegbaren Art zu einem Führungsfahrzeug gruppie-ren. Das Führungsfahrzeug ist mit einem Bediener besetzt. Das Führungsfahrzeug sollte manuell oder automatisiert bedient werden. Die teilautonomen Feldschwarmeinheiten sollten diesem Führungsfahrzeug folgen.

Dieser Ansatz bietet den Vorteil, dass die teilautonomen Feldschwarmeinheiten eine Vergrößerung der Arbeitsbreite sind. Die Koordinierung der Maschinen sollte durch die Fahrbewegung des Führungsfahrzeuges erfolgen. Herausfordernd sind hierbei Aufga-ben wie das Wenden am Feldrand oder die Umfahrung von Hindernissen. Die Lösung dieser Aufgaben wurde als zu komplex angesehen. Insbesondere die Wendemanöver mit einem Feldschwarm, der aus mehreren Maschinen besteht, würde hohe Anforde-rungen an die zeitliche Reihenfolge des Wendens, das Ermitteln kollisionsfreier Pfade sowie der Zuordnung von Arbeitsbereichen erfordern. Für die Lösung dieser Aufgaben wird ein Lösungsalgorithmus benötigt, der in Echtzeit dieses komplexe Problem löst.

Aus diesen Gründen wurde ein Ansatz gewählt, bei dem für jedes Fahrzeug und jede Maschine eines Schwarms eine vollständige Planung der Fahrwege, der Arbeitsaufga-ben und des Zeitbedarfes erstellt wird. Die Planung erfolgt vor dem Einsatz eines Feld-schwarms. Die Berechnung der Pfade erfolgt in diesem Fall nicht auf den elektroni-schen Steuerungen der Maschinen, sondern auf Computern oder Servern. Damit steht eine größere Rechenleistung zur Verfügung. Als Ergebnis dieser Planung entsteht für jede Maschine eine Mission, welche an die Maschinen übertragen wird. Zur Laufzeit erfolgt eine Überwachung der Fahrwege und der Positionen der Maschinen. Damit kann der Berechnungsaufwand auf den Steuerungen der Maschinen sowie die Menge der zu übertragenden Daten minimiert werden.

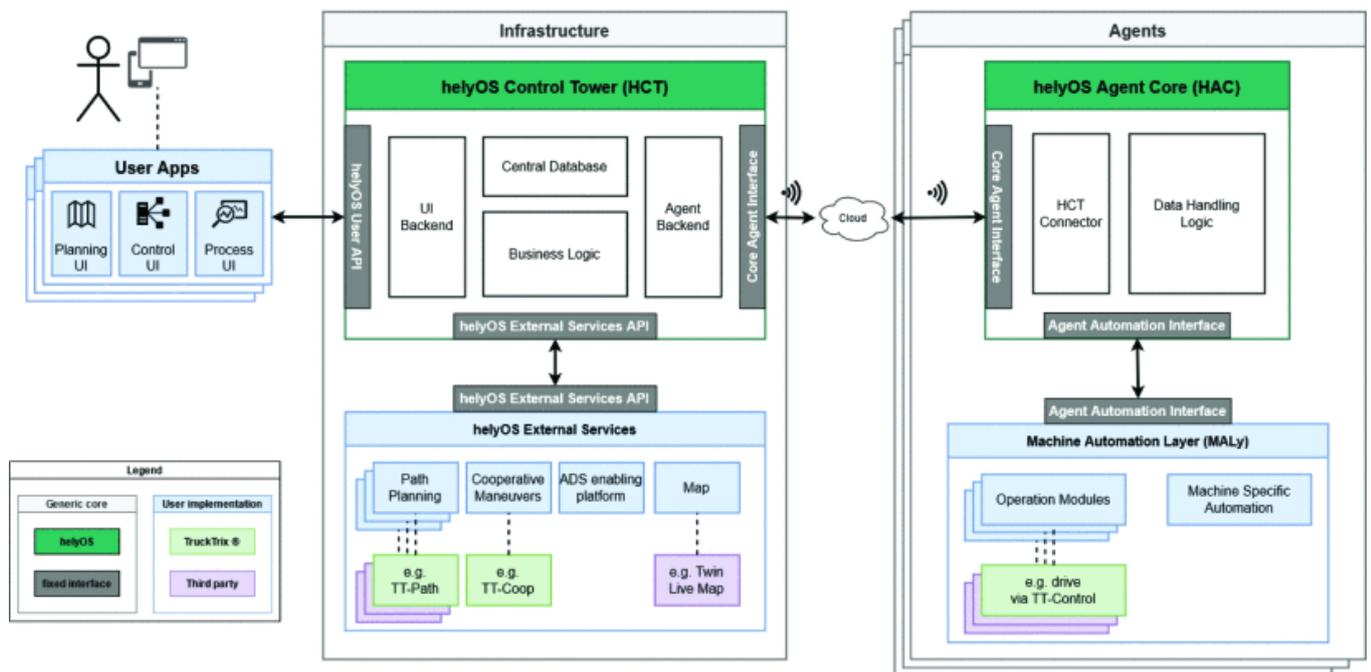
Die Erstellung von Missionen, die Übertragung der Missionen auf die Maschinen sowie die Überwachung während der Bearbeitung der Missionen wird mit einer Schwarmfüh-rung realisiert. Vom Fraunhofer IVI wurde hierzu die Software mit dem Namen helyOS (Highly Efficient online Yard Operating System) entwickelt. [1], [2]

### 2.3.2 Aufbau und Funktionsweise helyOS

Die Motivation und die Idee zur Entwicklung des helyOS entstand aus der langjährigen Beschäftigung des Fraunhofer IVI mit den Themen der Lenkung und Führung von über-langen Fahrzeugen (z. B. Projekt AutoTram Extra Grand), der Planung von Fahrwegen für überlange Fahrzeuge sowie der Automatisierung von Fahrbewegungen in Logistik-zentren und Betriebshöfen (Projekt AutoTruck).

In Abb. 3 ist der Aufbau des helyOS dargestellt. Es unterteilt sich in zwei Hauptbestand-teile.

## helyOS - highly efficient online yard Operating System



**Abb. 3** Aufbau des helyOS

Quelle: Fraunhofer IVI

Der helyOS Control tower HTC beinhaltet eine Datenbank und eine sogenannte »business logic«. In der Datenbank werden alle sogenannten »work processes« abgelegt. Ein »work process« entsteht u. a. durch eine Nutzereingabe, die eine neue Aufgabe für ein Fahrzeug oder eine Maschine festlegt. Eine Arbeitsaufgabe ist beispielsweise das Fahren von einer Position A zu einer Position B. Ein »work process« kann im einfachsten Fall aus einer Aufgabe bestehen, umfasst typischer Weise jedoch mehrere Aufgaben. Die Aufgaben können in einer Reihenfolge oder auch parallel abgearbeitet werden. Bei der gleichzeitigen Bewegung mehrerer Fahrzeuge oder Maschinen werden Arbeitsaufgaben mit Zuordnung von Zeitstempeln generiert, so dass eine räumliche und zeitliche Koordinierung stattfindet.

Die »work processes« werden durch die »business logic« verwaltet. Dies umfasst u. a. die Prüfung der Vollständigkeit von Angaben, die Bearbeitungsreihenfolge, den Erledigungsstand oder zeitliche Zuordnungen.

Der helyOS-HTC verfügt über verschiedene Schnittstellen. Über die Schnittstelle »helyOS user API« können Nutzerschnittstellen für die Eingabe und Bedienung angebunden werden. Damit wird auch die Einbindung von helyOS in andere Softwareanwendungen ermöglicht.

Die Schnittstelle »helyOS External Services API« bindet Anwendungsprogramme für die Pfadplanung, die kooperative Manöverplanung, Kartendaten oder Datendienste an.

Die Schnittstelle »core Agent Interface« stellt die Verbindung zu den sogenannten Agenten her. Die Verbindung verwendet eine drahtlose Kommunikation per WLAN oder mobilen Datenfunk (z. B. LTE, 5G).

Agent sind Fahrzeuge und Maschinen, aber auch andere Systeme, welche Daten und Informationen bereitstellen. Das können beispielsweise externe Sensoren oder Kameras sein.

Jeder Agent hat ebenfalls die Schnittstelle »Core Agent Interface«, um den Datenaustausch mit dem helyOS-HCT zu ermöglichen. Mit dem HCT-Connector wird die Verbindung zum helyOS-HCT aufgebaut. Der Block »data handling logic« bereitet die zu sendet und zu empfangenden Daten auf, so dass diese den Schnittstellenspezifikationen entsprechen.

Die Schnittstelle »Agent Automation Interface« bildet die Schnittstelle in Richtung des Automatisierungssystems. Der Block »Machine Automation Layer« kapselt die Funktionen der Automatisierung. Die Automatisierung stellt ihrerseits Schnittstellen zur Fahrzeug- oder Maschinensteuerung bereit. Diese sind innerhalb der anwendungsspezifisch in den »operation Modules« ausgeprägt.

»Operation Modules« übernehmen beispielsweise die Pfadfolgeregelung, die Auswertung der GNSS-Daten und deren Umrechnung in lokale Koordinaten, die Auswertung von Daten der Umfelderkennung oder die Missionsverwaltung.

Für die Maschine FSE II ist der helyOS-Agent auf einem separaten Industrie-PC installiert. Der Block »maschine automation layer« verwendet das sogenannte Robot operation system (ROS). Das ROS wird von einer Entwicklergemeinschaft erstellt. Es basiert auf open-source-Software.

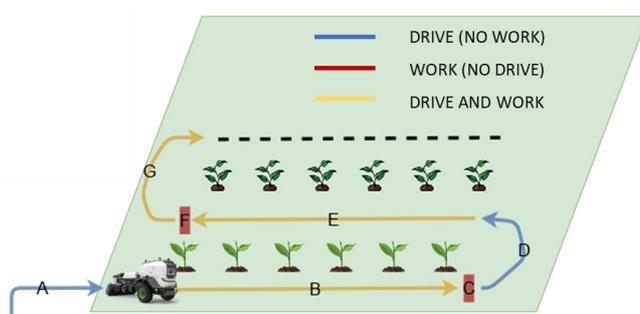
### 2.3.3 Missionen

Innerhalb des helyOS können für komplexe Aufgaben sogenannte Missionen erstellt werden. Die Missionserstellung erfolgt im helyOS-HCT. Die Missionen werden vom helyOS-HCT auf die helyOS-Agenten übertragen und gelangen hier zur Ausführung.

Missionen beinhalten alle notwendigen Informationen, um eine Aufgabe zu erfüllen. Die Informationen umfassen:

- Angaben zum Pfad
- Angaben zu Zeit oder Zeitpunkten
- Angaben zu Arbeitsprozessen
- Angaben zur Geschwindigkeit
- Angaben zu anderen Funktionen, die während der Missionsabarbeitung ausgeführt werden sollen.

In der Abb. 4 ist beispielhaft eine Mission abgebildet. Eine Mission unterteilt sich in verschiedene Aufgaben (Tasks). Im Beispiel sind insgesamt 7 Aufgaben, bezeichnet mit A bis G, eingezeichnet.



**Abb. 4 Beispiel für eine Mission**  
Quelle: Fraunhofer IVI

Die Aufgabe A beinhaltet das Heranfahren an die erste zu bearbeitende Spur. Die Aufgabe B beinhaltet das Fahren auf dem vorgeplanten Pfad. Zum Beginn der Aufgabe B wird der Werkzeugprozess ausgelöst, d. h. das Werkzeug wird in den Boden eingeführt. Am Ende der Aufgabe B wird das Werkzeug ausgehoben. Die Aufgabe C kann beispielsweise das Prüfen des Werkzeugzustandes oder des Werkzeugverschleißes beinhalten. Die Aufgabe D ist das Wendemanöver im Vorgewende, um in eine neue Fahrspur zu gelangen. Die Aufgaben gemäß B, C und D schließen sich wiederholt an.

Die dargestellte Mission für eine einzelne Maschine kann im helyOS für mehrere Maschinen vorgeplant werden. Durch die Vorplanung der Pfade, aber auch der geplanten Zeitpunkte der Befahrung, erfolgt die Koordinierung der Maschinen. Während die Maschinen ihre Missionen ausführen, sind deren Umfelderkennungssysteme aktiv. Kollisionen oder ungewollte zu dichte Annäherungen an andere Maschinen und Fahrzeuge oder Personen sollen mit diesem System vermieden werden. Der Bediener am helyOS-HCT kann die Missionen der Maschinen jeder Zeit abbrechen.

Das helyOS wurde als Software-Prototyp für die Bedienung der Feldschwarmeinheiten ausgeprägt und für die Inbetriebnahme der Maschine FSE II, die Erprobung auf dem Testgelände des Fraunhofer IVI und für die Feldversuche verwendet.

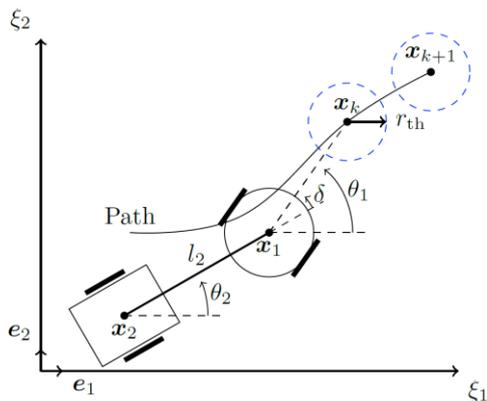
## 2.4 Pfadfolge-Regler

Ein Pfadfolge-Regler hat die Aufgabe, ein Fahrzeug oder eine selbstfahrende Maschine entlang eines vorgegebenen Pfades zu führen. Der Pfad selbst wird durch einen Pfadplaner erstellt. Bei der Pfadplanung sind die Abmessungen des Fahrzeuges, dessen Kinematik und die Freiheitsgrade der Bewegung (Lenkfähigkeit, mehrteilige Fahrzeuge) zu berücksichtigen. Weiterhin sind Einschränkungen der Befahrbarkeit (Hindernisse, nicht befahrbare Flächen, Höhenbeschränkungen) entlang des zu planenden Pfades zu berücksichtigen. Somit kann der geplante Pfad vom Fahrzeug grundsätzlich befahren werden.

Der Pfad muss in geeigneter Weise von elektronischen Steuerungen im Fahrzeug verarbeitet werden. Eine notwendige Bedingung ist, dass aus den Daten, die den Pfad beschreiben in Echtzeit im Fahrzeug der Pfad erstellt oder rekonstruiert werden kann. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit der elektronischen Steuerung ist zu beachten.

Der Pfad wird nicht als Funktion oder Kontinuum bereitgestellt. Der Pfad wird durch Stützpunkte in einer Ebene abgebildet (diskrete Abbildung). Das geometrische Prinzip ist in Abb. 5 dargestellt. Die grundsätzliche Idee des Punkt-Folge-Reglers («path follow controller» PFC) ist, den jeweils nächsten vor dem Fahrzeug liegenden Punkt anzusteuern. Dabei ist zu beachten, dass zwischen der Ist-Position und der Soll-Position eine Differenz besteht. Um von der aktuellen Fahrzeugposition ( $x_i$ ) zum nächsten Stützpunkt zu gelangen ( $x_k$ ) wird aus den Positionsdaten ein Lenkwinkel  $\delta$  berechnet. [3]

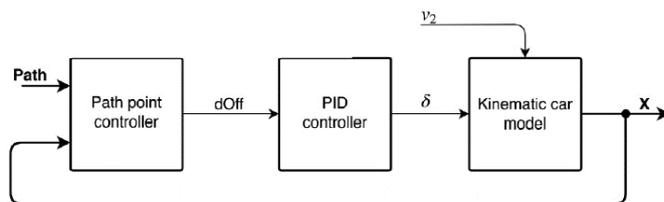
Diese Methode verursacht Diskontinuitäten und Sprünge im Lenkwinkel. Die Abweichung zwischen dem Verlauf des Sollpfades und dem Istpfad ist abhängig von der Dichte der Punktwolke. Zur Lösung des Problems wird ein Ansatz implementiert, der gewichtet weitere Punkte ( $x_{k+1}$ ,  $x_{k+2}$  und weitere) berücksichtigt.



**Abb. 5 Punkt-Folge-Regelung - Grundprinzip**  
Quelle: Fraunhofer IVI

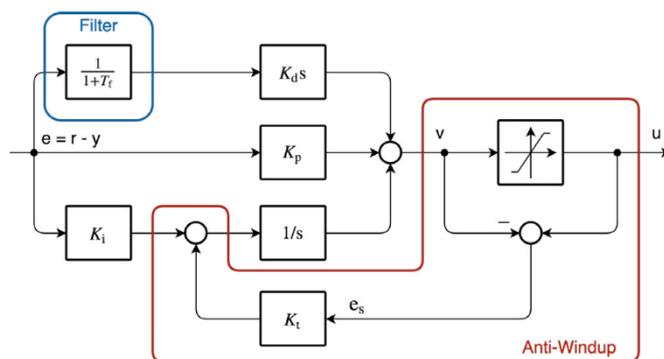
Die Diskontinuitäten im berechneten Lenkwinkel machen sich im Fahrzeug durch sprunghafte Lenkwinkeländerungen bemerkbar. Diese erzeugen in Fahrzeugquerrichtung spürbare Beschleunigungen, welche als Ruck wahrgenommen werden. Dies mindert den Fahrkomfort für Personen. Die Feldschwarmeinheiten sind nicht mit Personen besetzt, so dass dieser Effekt nur eine untergeordnete Bedeutung hat.

In einem zweiten Ansatz wird ein sogenannter »cross track error controller« (CTEC) entwickelt. Dieser Regler hat zum Ziel, die Differenz zwischen Soll- und Istpfad auf null zu regeln. Die Abb. 6 zeigt das Grundprinzip des Reglers.



**Abb. 6 Grundprinzip des Reglers cross track error controller (CTEC)**  
Quelle: Fraunhofer IVI

In der praktischen Umsetzung muss der I-Anteil des Reglers mit einem sogenannten Anti-Windup zur Begrenzung des Integralanteils im PID-Regler ausgestattet werden.



**Abb. 7 Praktische Implementierung des PID-Reglers mit Anti-Windup**  
Quelle: Fraunhofer IVI

Beide Methoden verfolgen simple Ansätze. Die verwendeten Methoden haben Vor- und Nachteile bezüglich der erzielbaren Genauigkeit und Kontinuität bei der Spurführung des Fahrzeuges. Für die Umsetzung in der Maschine FSE II wurden beide Methoden miteinander kombiniert.

In der Fahrerprobung der Maschine FSE II wurden auf dem Testgelände des Fraunhofer IVI zufriedenstellende Ergebnisse bei der Positionsgenauigkeit und der Wiederholgenauigkeit bei mehrfachen Fahrversuchen erzielt werden.

### 3

## Literaturverzeichnis

- [1] G. Nitzsche, S. Wagner, N. Belov und C. Viol Barbosa, , »AutoTruck and helyOS: Enabling highly efficient yard operation by automation,« in *Proceedings of 8th Transport Research Arena TRA 2020*, Helsinki, 2020.
  
- [2] G. Nitzsche, S. Wagner und N. Belov, »helyOS - Highly Efficient Online Yard Operating System,« in *15th International Conference Commercial Vehicles 2019 : Truck, Bus, Van, Trailer*, Düsseldorf, 2019.
  
- [3] J. Kolb, G. Nitzsche und S. Wagner, »A simple yet efficient Path Tracking Controller für Autonomous Trucks,« in *Proceedings of the 10th IAFC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicle*, (pp. 307 - 312), Danzig, 2019.