

Kooperative Agrarprozesse resilient gestalten und dynamisch optimieren

Die Modellierung, Ausführung und Optimierung von digitalisierten Agrarprozessen am Beispiel einer Flüssigmistausbringung im Projekt OPeRAtePlus

Frank Nordemann¹, Ralf Tönjes¹, Heiko Tapken¹ und Lukas Hesse¹

Abstract: Die Digitalisierung von Arbeitsabläufen in der Landtechnik schreitet kontinuierlich voran. Arbeitsaufträge und Prozessdaten werden zunehmend digital ausgetauscht, verarbeitet und analysiert. Als Herausforderung hat sich jedoch die resiliente Gestaltung und Ausführung von kooperativen Agrarprozessen herausgestellt. Auf ländlichen Flächen können die Kommunikationsmöglichkeiten zwischen kooperativen Akteuren beschränkt sein, wodurch Prozessabläufe behindert werden oder fehlschlagen können. Auch Maschinenausfälle führen häufig zu Fehlern und Abbrüchen in den digitalisierten Prozessen. Am Beispiel einer kooperativen Flüssigmistdüngung aus dem OPeRAtePlus-Forschungsprojekt veranschaulicht dieser Beitrag, wie kooperative Agrarprozesse resilient gestaltet und zugleich hinsichtlich weiterer Kriterien (z. B. Genauigkeit/Kosten/Zeit der Prozessausführung) dynamisch optimiert werden können. Hierzu wird die Prozessbeschreibungssprache Business Process Model and Notation (BPMN) erweitert, um die Resilienz in unzuverlässigen Kommunikationsumgebungen zu verbessern. Die verbesserte Zuverlässigkeit wird durch Simulationen und Einsatz im Feld nachgewiesen.

Keywords: Prozesse in der Landwirtschaft, resiliente Modellierung von Geschäftsprozessen, unzuverlässige Kommunikationsumgebungen, Business Process Model and Notation (BPMN), Directed Acyclic Graph (DAG)

1 Einleitung

Die Digitalisierung hat ein großes Potential, die Effizienz von Arbeitsabläufen zu verbessern und Fehler zu reduzieren. Zudem erfordern gesetzliche Nachweispflichten, wie z. B. bei der Düngerausbringung, eine rechtssichere Dokumentation. Allerdings können im ländlichen Bereich die Kommunikationsmöglichkeiten zwischen den kooperativen Akteuren (Landwirt, Lohnunternehmer, Dienstleister, digitaler Vermittler, Behörde) beschränkt sein, wodurch Prozessabläufe behindert werden oder fehlschlagen können. Auch Maschinenausfälle führen häufig zu Fehlern und Abbrüchen in den digitalisierten Prozessen. Am Beispiel einer kooperativen Flüssigmistdüngung aus dem OPeRAtePlus-

¹ Hochschule Osnabrück, Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik, Albrechtstr. 30, 49076 Osnabrück, info@franknordemann.de; {r.toenjes;h.tapken;lukas.hesse}@hs-osnabrueck.de

Forschungsprojekt untersucht dieser Beitrag, wie kooperative Agrarprozesse resilient gestaltet und dynamisch optimiert werden können.

Abb. 1 zeigt ein typisches Szenario zur Flüssigmistdüngung. Aufgrund der vielen Medienumbrüche und nicht einheitlichen Prozesssteuerung bestehen erhebliche Fehlerpotenziale. Daher soll, wie in Abb. 2 gezeigt, der Anwender durch automatisierte Prozesssteuerung bei der Prozessdurchführung sowie der Datenerfassung, Datenbereitstellung, Visualisierung und der Erzeugung der Prozessdokumentationen entlastet werden. Von der vereinfachten Auftragserstellung des Landwirts beim landwirtschaftlichen Dienstleister über die Einbeziehung von historischen und teilflächenbezogenen Daten, über die assistierte Ausbringung auf dem Feld bis zur exakten Dokumentation und Weitergabe der ausgebrachten Düngemengen an die zuständige Behörde, soll eine sehr breite Unterstützung für die betroffene Anwendergruppe geboten werden. Dabei soll der Düngeprozess ohne Medienbruch und unter Einhaltung der aktuellen rechtlichen Verordnungen durchgeführt werden. Hierzu wird die Prozessbeschreibungssprache Business Process Model and Notation (BPMN) erweitert, um den speziellen Anforderungen in der Landtechnik gerecht zu werden. Insbesondere sind Erweiterungen notwendig, um die Resilienz in unzuverlässigen Kommunikationsumgebungen zu verbessern und die Agrarprozesse hinsichtlich weiterer Kriterien (z. B. Genauigkeit/Kosten/Ausführungszeit) dynamisch zu optimieren.

Der Artikel gliedert sich wie folgt. Kapitel 2 analysiert den Stand der Technik und notwendige Erweiterungen. Kapitel 3 entwickelt ein Metamodell, um mittels BPMN-Erweiterungen die Resilienz von Prozessen zu verbessern. Anschließend wird am Beispiel der Flüssigmistausbringung demonstriert, wie Prozesse resilient beschrieben werden können. Kapitel 4 zeigt, wie mit Hilfe von Graphen die Resilienz von Prozessen geprüft und optimale Prozesspfade bestimmt werden können. Die Evaluation der Verfahren erfolgt in Kapitel 5. Kapitel 6 fasst die Ergebnisse abschließend zusammen.

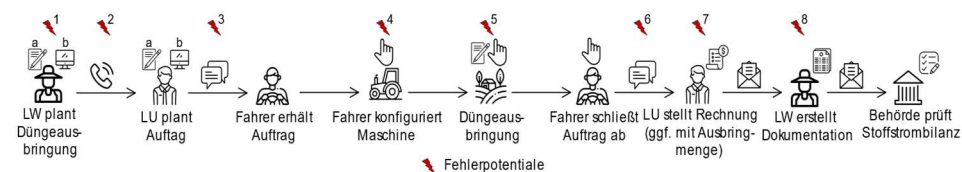


Abb. 1: Typisches Szenario eines aktuellen, fehlerbehafteten Prozesses zum Nährstoffmanagement

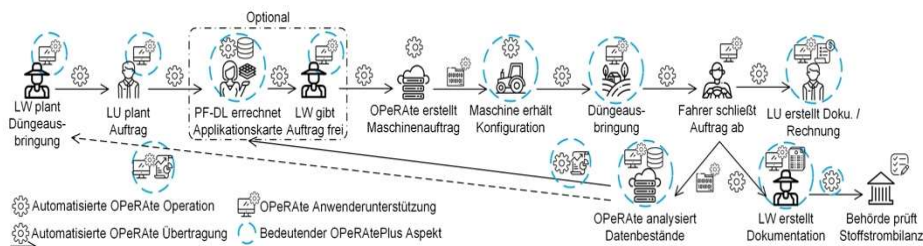


Abb. 2: Ganzheitliches Düngeszenario mit automatisierter Dokumentation in OPeRatePlus

2 Stand der Technik

Aus der Literatur sind verschiedene Verfahren zur Beschreibung und Optimierung von Geschäftsprozessen bekannt. Für die Beschreibung von Geschäftsprozessen in Banken, Geschäften und Lieferketten in der Industrie wurde die *Business Process Model and Notation 2.0* [OMG11] entwickelt. Aufgrund ihres Umfangs und ihrer Flexibilität, kollaborative Arbeitsprozesse zu beschreiben, wird sie heute in vielen weiteren Bereichen eingesetzt. Eine Übersicht über die Eigenschaften verschiedener Prozessmodellierungssprachen findet sich in [Va13]. Die Veröffentlichung identifiziert drei Dimensionen für die Performanz (Zeit, Kosten und Qualität), berücksichtigt aber keine Nicht-Performanzspezifischen Kriterien. [BoDA11] berücksichtigt auch Kriterien wie Zuverlässigkeit und Performanz für BPMN. [Bo14] nutzt *Metadaten*, um die Zuverlässigkeit von Prozessen zu simulieren. Die Analyse der Zuverlässigkeit von BPMN-Prozessen steht im Fokus von [MaDo16] und [ReDo15], während [DRM16] den Einfluss personeller und anderer Ressourcen auf die Zuverlässigkeit untersucht. Zudem finden sich in der Literatur Ansätze zur Integration von Dienstgütekriterien (*Quality of Information (QoI)*), wie die Zuverlässigkeit von Geräten und Ressourcen im *Internet of Things (IoT)* [Bo16; DRM20; MaDo14].

In [Ch15] wird ein Algorithmus für die Auswahl von *Web Services* aufgrund multipler Kriterien vorgestellt. Die Autoren von [Ma17] präsentieren einen Ansatz zur Optimierung von *Quality-of-Service*-Aspekten in Cloud-basierten Umgebungen zur Prozessausführung. Inspiriert durch Optimierungstechniken für datenintensive Prozesse im Datenmanagement entwickelt [Go16] ein Konzept zur automatischen Optimierung der Performanz von BPMN-Prozessen. Es wird eine Minimierung der Kosten durch Umordnung und Parallelisierung der Teilprozesse angestrebt. Der Ansatz verwendet zwar *Directed Acyclic Graphs (DAGs, [Ev11])*, nutzt aber nur eingeschränkte Strategien, um aus Prozessbeschreibungen Graphen abzuleiten und Prozesse zu optimieren. [DDG09] nutzt Graphen, um die Ähnlichkeit verschiedener Prozesse bezüglich deren Steuerung und Komponenten zu bewerten.

Die Verbesserung von Geschäftsprozessen ist ein wichtiger Aspekt von *Process-Mining*. Dieses Feld kombiniert Prozessmodellierung und -analyse mit *Computational Intelligence* und *Data Mining Technologien* [Va11]. Allerdings erfordert Process-Mining historische Daten (Event Logs) für die Analyse. Dies kann helfen, geeignete Kriterien für Kantengewichte zu finden, ist aber für die Aufgabenstellung dieses Artikels ungeeignet. Viele der gelisteten Publikationen adressieren nur ein Kriterium zur Prozesssteuerung (z. B. Zuverlässigkeit), konzentrieren sich auf einzelne Performanzkriterien (z. B. Zeit, Kosten, Qualität) oder sind auf eine bestimmte Anwendung limitiert. Daher wird ein flexibler Ansatz für die Beschreibung von Geschäftsprozessen in unzuverlässigen Umgebungen sowie deren Optimierung anhand multipler Kriterien benötigt, der sowohl Unterstützung zur Design- als auch Laufzeit bereitstellt.

3 Modellierung resilienter Prozesse

3.1 Metamodell *rBPMN*

Die Metamodelerweiterung *resilientes BPMN (rBPMN)* ergänzt BPMN um neue Elemente zur Verbesserung der Resilienz bei Ausfällen von Kommunikationsverbindungen und Teilprozessen (s. Abb. 3).

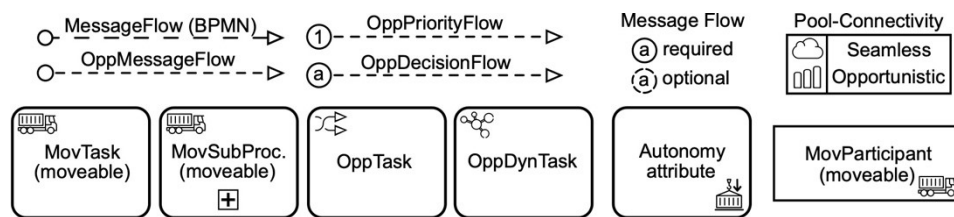


Abb. 3: Neue Modellierungselemente zur Unterstützung von Prozessresilienz gegen unzureichende Kommunikationsmöglichkeiten und Maschinenausfälle

rBPMN erweitert die bisherigen BPMN-Nachrichten um opportunistische Nachrichtentypen (*OppMessageFlows*) für unzuverlässige Verbindungen. Zugehörige Zuverlässigkeitsmaße, die entweder i) geschätzt oder ii) aus Statistiken vorhergehender Läufe bestimmt werden, charakterisieren die Verbindung. Die Zuverlässigkeitsmaße bilden die Basis für die Verifikation der Prozessresilienz. *Opportunistic Priority Flows (OppPriorityFlows)* und *Opportunistic Decision Flows (OppDecisionFlows)* sind Spezialisierungen von *OppMessageFlows* und ermöglichen die Definition von alternativen Verbindungen im Falle eines Verbindungsausfalls. Während *OppPriorityFlows* den Alternativen feste Prioritäten zuordnen, erlauben es *OppDecisionFlows* dynamisch die am besten geeignete Alternative basierend auf Charakteristika wie Resilienz, Genauigkeit, Kosten, etc. zu wählen.

Eine vollständige Vermeidung von Kommunikationsunterbrechungen ist in einigen Szenarien nicht möglich. Daher unterstützt *rBPMN* die Verschiebung von Funktionalitäten zwischen den Prozessbeteiligten, um Resilienz durch eine, ggf. leistungsreduzierte, lokale Ausführung herzustellen: Verschiebbare Aufgaben, Subprozesse und Teilnehmer (*MovTasks*, *MovSubProc.*, *MovParticipants*) bieten Funktionalität, die von *Opportunistic Tasks (OppTaks / OppDynTasks)* genutzt werden kann. *OppDynTasks* ermöglichen neu hinzukommende Teilnehmer dynamisch als Alternativen einzubinden. Mithilfe von Annotationen können lokal verschobene Funktionalitäten, Verbindungstypen der Teilnehmer und Nachrichtenflüsse als notwendig oder optional gekennzeichnet werden. *OppMessageFlows* enthalten szenariospezifische Verbindungsbeschreibungen wie Mindestbandbreite und maximale Unterbrechungszeit. Weitere Beschreibungen umfassen die Nachrichteneigenschaften (Größe, Sendeintervall, etc.) und erforderliche Dienstgüte (QoS mit Latenz, Fehlerwahrscheinlichkeit, etc.). Der Vergleich der Verbindungseigenschaften mit Nachrichtenanforderungen und QoS ermöglicht die Prädiktion der Erfolgs- bzw. Ausfallwahrscheinlichkeit einer Verbindung.

Eine detaillierte Beschreibung der in Abb. 3 abgebildeten *rBPMN* Elemente findet sich in [NTP20] und [No20].

3.2 Beispiel: Prozessmodell für Flüssigmistausbringung

Abb. 4 zeigt beispielhaft ein *rBPMN*-Diagramm eines Prozesses S zur Flüssigmistausbringung. Der Prozess nutzt fortgeschrittene Precision-Farming-Methoden, um Flüssigmist umweltfreundlich auszubringen, und greift dafür auf Dienste unterschiedlicher Teilnehmer zu. *OppDecisionFlows*, die durch die *OppMessageGroups* *a*, *b*, *c* gruppiert werden, zeigen, dass nicht alle involvierten Verbindungen für eine resiliente Prozessdurchführung benötigt werden. Stattdessen ist nur eine Verbindung (für *a*, *b*) oder keine (für *c*) zwingend notwendig. Allerdings beeinflusst die Anzahl der möglichen Verbindungen zu Prozessteilnehmern Gütekriterien wie Robustheit, Genauigkeit, Kosten und Zeit. Der Prozess S gliedert sich in drei Teilprozesse *S_a*, *S_b* und *S_c*. In *S_a* entscheidet der Anwender, ob Precision Farming genutzt wird und ggf. ob die *Applikationskarte (AppMap)* für die Flüssigmistausbringung automatisch (aPF) oder manuell (mPF) mit erhöhter Genauigkeit erstellt wird. In *S_b* wird die Analysemethode für die Inhaltsstoffe des Flüssigmistes (Stickstoff, Phosphor, etc.) gewählt. Alternativ stehen *Laboranalyse (LAB)*, Nutzung des *NIR-Sensors (NIRS)* oder eine *Referenztabelle* für tierabhängige (Rind, Schwein, etc.) Inhaltsstoffe (*REF*) zur Verfügung, die jeweils unterschiedliche Genauigkeiten bieten. Letztendlich bietet *S_c* drei Optionen für die Ausbringung des Flüssigmistes mit unterschiedlicher Genauigkeit: ein *Global Navigation Satellite System (GNSS)* wie *GPS*, *Real Time Kinematik (RTK)* mit verbesserter Genauigkeit durch *Mobilfunkdienste (CELL)* oder *lokale Stationen in Feldnähe (LOC)*. Anhand dieses Prozessmodells sollen die folgenden Verfahren erläutert werden.

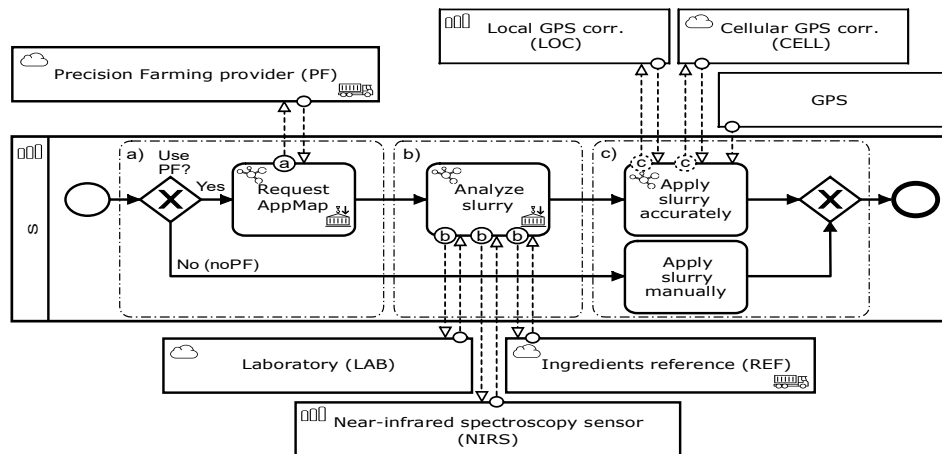


Abb. 4: Generalisierter Flüssigmistprozess S mit verschiedenen Optionen a) zum Precision Farming, b) zur Flüssigmistanalyse und c) zur ortsbezogenen Ausbringung

4 Graphbasierte Prozessoptimierung

Das Ziel der Prozessoptimierung ist es, den besten Pfad zur Prozessausführung zu finden. Die Prozessoptimierung beginnt mit der Definition der Kriterien anhand derer der Prozess optimiert werden soll. Als Kriterien für den Prozess S wurden solche gewählt, die auch für andere Prozesse typisch sind:

- Robustheit: Stabilität der Prozesskommunikation;
- Genauigkeit: Präzision des Ergebnisses der Aktivität;
- Kosten: monetärer Wert für Ausführung der Aktivität;
- Zeit: benötigte Dauer für Ausführung der Aktivität.

4.1 Erzeugung des Prozessgraphen

Dieser Abschnitt untersucht, wie Prozesse in Graphen, genauer DAGs, überführt werden können. Abb. 5 zeigt den resultierenden gerichteten Graphen für Prozess S, der im Knoten S beginnt und zum Endknoten S' führt.

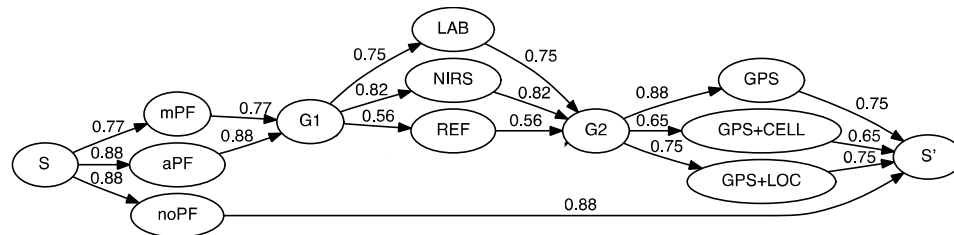


Abb. 5: Für die Resilienz- und Prozessanalyse in einen gerichteten Graphen überführter Flüssigmistprozess S

Der Prozessabschnitt S_a enthält drei Alternativen: Zuerst ist zu entscheiden, ob Precision Farming genutzt werden soll und wenn ja, ob die Applikationskarte automatisch oder manuell erstellt werden soll. Diese Alternativen werden durch drei Pfade (noPF, aPF und mPF) repräsentiert. Während die eine Applikationskarte nutzenden Prozesse im Knoten G1 enden, erfordert der Pfad ohne Applikationskarte noPF keine weiteren Entscheidungen und endet sofort in S'. Der Knoten G1 wird als Verbindungsknoten eingeführt, um alternative Pfade wieder zusammenzuführen. Der Prozessabschnitt S_b unterscheidet drei Alternativen zur Bestimmung der Inhaltsstoffe durch Laboranalyse (LAB), NIR-Sensor (NIRS) oder Referenztablette (REF), die durch entsprechende Pfade dargestellt werden. Der folgende Prozessabschnitt S_c unterscheidet drei Alternativen zur Ortbestimmung, die entweder GPS (GPS) oder GPS mit Korrekturdaten über Mobilfunkdienste (CELL) oder von lokalen Stationen (LOC) nutzen. GPS ist ein notwendiger Teilprozess jedes Pfades. Die sich in CELL bzw. LOC aufteilenden Pfade können in GPS/CELL bzw. GPS/LOC Pfade fusioniert werden, um einen kompakteren Graphen zu erzielen. Hierzu müssen die Kantengewichte entsprechend umgerechnet werden (s. nächster Abschnitt). Ein detailliertes Regelwerk zur Erzeugung von Graphen aus Prozessmodellen beschreibt [NTP20].

4.2 Pfadmetriken

Der nächste Schritt ist die Bestimmung der Kantengewichte des Graphen. Das Gewicht beschreibt, wie gut ein Prozesselement das jeweilige Kriterium erfüllt. Um die Vergleichbarkeit verschiedener Szenarien zu unterstützen ist eine Normierung notwendig. Je nach Kriterium und Prozesselement kann ein Gewicht einer eingehenden, einer ausgehenden Kante oder dem Knoten selbst zugeordnet sein. So sind beispielsweise Genauigkeit, Kosten und Zeit Eigenschaften des RTK-basierten Dienstes und somit Knoten CELL im Prozess S. Dahingegen beschreibt Robustheit die Stabilität der Kommunikation und kann den Kanten, d.h. ein- und ausgehenden Nachrichten, zum Knoten CELL zugeordnet werden. Da viele Suchalgorithmen, wie beispielsweise Dijkstra's Shortest-Path [Ev11], auf Kantengewichten basieren, wird empfohlen, die Gewichte der Knoten zu Kanten zu verschieben. Dies kann durch i) Aufteilung des Knotens und Einfügen einer künstlichen Kante oder ii) Verschieben auf die eingehende oder ausgehende Kante erfolgen. Der letzte Fall erzeugt kompaktere Graphen und wird im Folgenden verwendet. Die Bestimmung der Kantengewichte ist in [No22] beschrieben.

Die Robustheit R , d.h. Zuverlässigkeit einer Kommunikationsverbindung, kann durch Wahrscheinlichkeiten $P_w^R \in [0, 1]$ ausgedrückt werden (s.a. Kap. 4.4). Auch die anderen Kriterien i wie Genauigkeit, Kosten und Zeit können durch eine entsprechende Kostenfunktion $C_w^i \in [0, 1]$ repräsentiert werden. Da üblicherweise Robustheit und Genauigkeit zu maximieren und Kosten und Zeit zu minimieren sind, wird empfohlen, die Funktion für letztere zu invertieren, um einheitliche Suchalgorithmen anwenden zu können.

Für die Analyse von Graphen mit mehreren Kriterien existieren zwei Möglichkeiten: 1. Der Graph wird für jedes Kriterium dupliziert und separat analysiert. 2. Die Kriterien werden gewichtet zusammengefasst und der Graph anschließend analysiert. Letzteres erfordert eine Normierung der Kriterien, ermöglicht aber, an jeder Verzweigung die Pfadentscheidungen basierend auf allen (zusammengefassten) Kriterien wahrzunehmen.

$$P_w = \alpha_0 P_w^R + \sum_{i=1}^k \alpha_i C_w^i \quad \text{mit} \quad \sum_{i=0}^k \alpha_i = 1 \quad (1)$$

Teilprozesse in Graphen können für die übersichtliche Analyse zusammengefasst werden. Bei der Aggregation der Kantengewichte sind Reihen- (2) und Parallelschaltung (3) von Kanten zu unterscheiden:

$$P_{\text{Reihe}} = \prod_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

$$P_{\text{Parallel}} = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_j) \quad (3)$$

4.3 Graphbasierte Suchalgorithmen

Zur Identifikation des besten Prozesspfades können graphbasierte Suchverfahren eingesetzt werden. Dies erfolgt entweder durch Breitensuche [Ev11] oder Tiefensuche [Ta72], um alle möglichen Pfade zu ermitteln und anschließend den optimalen auszusuchen. Oder es wird ein Shortest-Path-Algorithmus wie Dijkstra [Ev11] und

Bellman-Ford [Be58] eingesetzt, um den Pfad mit den geringsten Kosten zu finden. Zudem kann mithilfe von Heuristiken, wie beispielsweise A*-Algorithmus, die Suche beschleunigt werden.

Allerdings erfordern die Suchalgorithmen eine bestimmte Metrik für die Kanten: Die Algorithmen basieren auf der Annahme, dass bessere Pfade ein kleineres Gewicht haben und das Gewicht des Gesamtpfades sich aus der Summe der Gewichte der Einzelpfade ergibt. Daher wird als Metrik für die Kanten ein Fehlerindex I wie folgt definiert:

$$I = -\log_b P \quad (4)$$

Damit haben zuverlässige Verbindungen ($P=1$) den Fehlerindex $I=0$ und fehlende Verbindungen ($P=0$) den Fehlerindex $I = \infty$. Der Fehlerindex I_G des gesamten Pfades ergibt sich zu

$$I_G = -\log_b(\prod_{i=1}^n P_i) = -\sum_{i=1}^n \log_b P_i = \sum_{i=1}^n I_i \quad (5)$$

Der Suchalgorithmus bestimmt den Pfad mit dem minimalen gesamten Fehlerindex $I_G \rightarrow \min$ als optimalen Pfad.

4.4 Resilienzanalyse

Ein Maß für die Resilienz R einer Kommunikationsverbindung ist die Anzahl der möglichen Nachrichtenrahmen pro Zeitfenster. Damit wenigstens ein Rahmen gesendet werden kann, muss für eine resiliente Verbindung $R \geq 1$ gelten. Es wird eine Funktion gesucht, die $R \in [0, \infty]$ auf $P \in [0, 1]$ abbildet. Eine Funktion, die diese Bedingung erfüllt, ist

$$P_i = 1 - b^{-R} \quad (6)$$

Damit eine Verbindung resilient, d.h. $R \geq 1$ ist, muss gelten $P_i \geq \frac{b-1}{b}$. Wählt man als Basis $b=2$ ergibt sich als notwendige Bedingung für eine resiliente Einzelverbindung $P_i \geq \frac{1}{2}$ bzw. $I_i \leq -\log_2 P_i = 1$. Damit ein Prozess resilient ist, muss mindestens ein Pfad mit nur resilienten Einzelverbindungen existieren.

$$\exists I_G \text{ mit } I_i \leq 1 \text{ für } \forall I_i \in I_G \quad (7)$$

Hiermit kann vorab die Resilienz eines Prozesses geprüft werden.

5 Evaluation

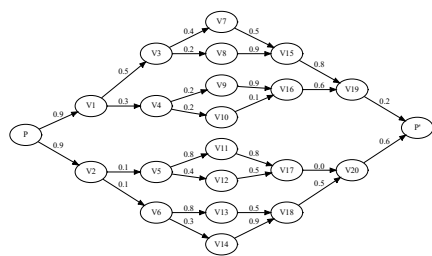
Dieser Abschnitt untersucht die Performanz der graphbasierten Suchverfahren zur Bestimmung der optimalen Prozesspfade und analysiert die Erfahrungen von Feldversuchen zur prozessgesteuerten Flüssigmistausbringung.

5.1 Performanz

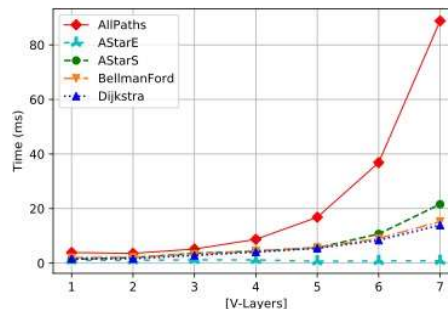
Die Prozesse in der Landwirtschaft involvieren häufig eine Vielzahl von räumlich verteilten Akteuren. Die Leistungsfähigkeit der Kommunikationsverbindungen und der beteiligten Geräte ist oft eingeschränkt, was bei der Prozessoptimierung, insbesondere zur Laufzeit, berücksichtigt werden muss. Daher wird zur Leistungsbewertung der Suchalgorithmen ein Raspberry Pi Zero WH verwendet. Die Konfiguration des Raspberry Pi umfasst einen ARM-1GHz-processor (BCM2835 SOC) und 512 MB RAM. Die Software zur Performanzmessung wurde in Java geschrieben und nutzt das OpenJDK Runtime Environment 1.8. Die graphbasierten Suchalgorithmen stellt die JGraphT-Library [LVD09] bereit. Es wurden 1.000 Wiederholungen pro Simulation durchgeführt.

Zur Evaluation der Algorithmen wurde ein Generator für Prozessgraphen realisiert. Er erzeugt Graphen, indem er die Pfade an jedem Knoten aufteilt und den Kanten zufällige Gewichte zuordnet. Es können Graphen unterschiedlicher Größe erzeugt werden. Vertikale Schichten (V-Layer) geben die Anzahl der aufeinanderfolgenden Knoten an, bei denen eine Pfadaufteilung erfolgt, bis die Pfade wieder sukzessive zusammengefügt werden. Horizontale Schichten (H-Layer) bestimmen die Anzahl der ausgehenden Kanten an jedem Knoten.

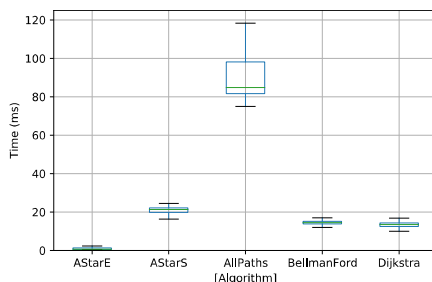
-0- -1- -2- -3-



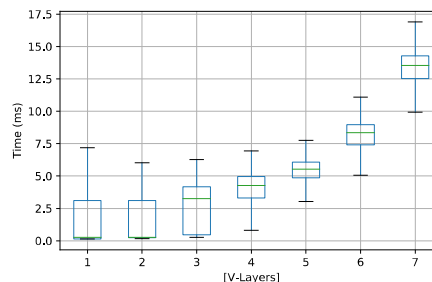
Prozessgraph mit 3 V-Layern



Pfadberechnungszeiten



Berechnungszeiten bei 7 V-Layern



Dijkstra-Berechnungszeiten

Abb. 6: Evaluation der Skalierung der Suchverfahren

Die Ergebnisse in Abb. 6 zeigen, dass ein Raspberry Pi Zero WH für die Suche optimaler Prozesspfade ausreichend ist. Die vollständige Suche (AllPaths) ist sehr aufwendig und

sollte bei größeren Netzen aus Skalierungsgründen gemieden werden. Der Dijkstra-Algorithmus skaliert besser. Bei großen Netzen sind ggf. Heuristiken zur Suchbeschleunigung zu verwenden. Allerdings ist die Performanz des A*-Algorithmus abhängig von den Heuristiken: AStarS benutzt den Quellknoten als Heuristik und skaliert wesentlich schlechter als AStarE mit Endknoten als Heuristik [No22].

5.2 Feldtests

Zur Erprobung der prozessgesteuerten Flüssigmistausbringung auf dem Feld wurde eine App für ein ISOBUS-Terminal entwickelt, die ein Güllefass zur teilflächenspezifischen Ausbringung steuert. Das Workflow-Management-System Camunda BPM wurde um *rBPMN*-Elemente erweitert. Abb. 7 zeigt die Implementation des Prozesses *S*, der Bestandteil des Flüssigmistwagens ist und die Steuerung während der Ausbringung übernimmt. Mit Hilfe von sogenannten Micro-services können beispielsweise Funktionen zur Erstellung von Applikationskarten als auch zur Analyse auf die Maschine verschoben werden, falls eine Cloudanbindung nicht zuverlässig umgesetzt werden kann. Die Funktionen werden als Services definiert, nach denen dynamisch über angepasste Spring-Eureka-Service-Registries zur Laufzeit gesucht werden kann und der Prozess für die bestgeeignete Option rekonfiguriert werden kann. Die Kommunikation erfolgt über Mobilfunk und WLAN und nutzt als Protokoll MQTT mit Schnittstelle zu BPMN. Die prototypische Umsetzung demonstrierte erfolgreich eine resiliente Prozesssteuerung mit medienbruchfreier Datenhaltung.

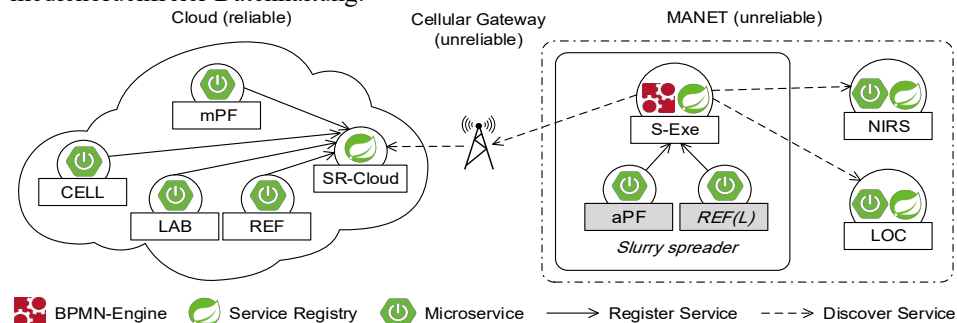


Abb. 7: Implementierung des Flüssigmistprozesses mittels BPMN-Runtime Engine und Microservices

6 Zusammenfassung

Dieser Artikel beschreibt, wie mit Hilfe von BPMN kooperative Prozesse modelliert und ausgeführt werden können. Um die Resilienz von Agrarprozessen und ihre optimale Ausführung zu gewährleisten, wurde die BPMN um zusätzliche Modellierungselemente und Analysemethoden erweitert. Für den Wegfall von Maschinen aufgrund unzureichender Kommunikation oder Maschinenfehler können Alternativen definiert und

dynamisch identifiziert werden. Weiterhin können Funktionen zwischen Akteuren verschoben werden, um diese lokal auszuführen und den Prozessablauf fortzusetzen.

Zudem wurden Analysemethoden entworfen, die die Resilienz eines Prozesses zur Planungszeit überprüfen und die Prozessausführung optimal an die aktuellen Gegebenheiten anpassen. Ein Prozessmodell wird dazu in einen gerichteten, azyklischen Graphen transferiert und die Kanten gewichtet, um beispielsweise die Resilienz der im Prozess genutzten Kommunikationsverbindungen zu beschreiben. Mit einer anschließenden graphenbasierten Pfadsuche kann die Resilienz des gesamten Prozessmodells untersucht sowie der optimale Prozesspfad identifiziert werden. Bei Feststellung einer unzureichenden Resilienz kann das Prozessmodell vor der Ausführung angepasst werden, um einen Prozessabbruch zur Laufzeit zu verhindern. Auf Basis einer Multi-Kriterien-Prozessanalyse können neben der Resilienz weitere Aspekte wie Genauigkeit, Kosten und Zeit berücksichtigt und Prozesskonfiguration kontinuierlich zur Laufzeit überwacht und optimiert werden. Damit stehen erstmals aus der industriellen Prozessautomatisierung bekannte Werkzeuge für den Einsatz in fehleranfälligen, dynamischen landwirtschaftlichen Prozessen zur Verfügung.

Im praktischen Einsatz führt die digitalisierte Prozesssteuerung und -dokumentation zu effizienteren und fehlerunanfälligeren Arbeitsabläufen. Unterstützt durch eine Benutzeroberfläche für Landwirte und Lohnunternehmen, ein Modul zur Berechnung teilflächenspezifischer Applikationskarten, ein intelligentes Güllefass sowie ein via MQTT angebundenes ISOBUS-Terminal können Flüssigmistprozesse auf diesem Weg volldigitalisiert/medienbruchfrei ausgeführt und rechtssicher dokumentiert werden.

Literaturverzeichnis

- [Be58] Bellman, R.: On a routing problem. Quarterly of applied mathematics 16(1), S. 87-90, 1958.
- [Bo14] Bocciarelli, P. et.al: Simulation-based performance and reliability analysis of business processes. In: Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference, S. 3012-3023, 2014
- [Bo16] Bocciarelli, P. et.al: A BPMN extension to enable the explicit modeling of task resources. In: CIISE, S 40-47, 2016.
- [BoDA11] Bocciarelli, P., D'Ambrogio, A.: A BPMN extension for modeling non-functional properties of business processes. In: Proceedings of the 2011 Symposium on Theory of Modeling & Simulation, S. 160-168, 2011.
- [Ch15] Chhun, S. et.al.: A multi-criteria service selection algorithm for business process requirements. arXiv preprint arXiv:1505.03998, 2015.
- [DDG09] Dijkman, R., Dumas, M., Garcia-Banuelos, L.: Graph matching algorithms for business process model similarity search. In: International conference on business process management. S. 48-63, 2009.
- [DRM16] Domingos, D., Respicio, A., Martinho, R.: Using resource reliability in BPMN processes. Procedia Computer Science 100, S. 1280-1288, 2016.

- [DRM20] Domingos, D., Respicio, A., Martinho, R.: Reliability of IoT-aware BPMN healthcare processes. In: Virtual and Mobile Healthcare: Breakthroughs in Research and Practice, S. 793-821, 2020.
- [Ev11] Even, S.: Graph algorithms. Cambridge University Press, 2011
- [Go16] Gounaris, A.: Towards automated performance optimization of BPMN business processes. In: East European Conference on Advances in Databases and Information Systems. S. 19-28, 2016.
- [LVD09] Lohmann, N., Verbeek, E., Dijkman, R.: Petri net transformations for business processes - a survey. In: Transactions on petri nets and other models of concurrency II, S. 46-63, 2009.
- [MaDo14] Martinho, R., Domingos, D.: Quality of information and access cost of IoT resources in BPMN processes. *Procedia Technology* 16, S. 737-744, 2014.
- [MaDo16] Martinho, R., Domingos, D., Respicio, A.: Evaluating the reliability of ambient-assisted living business processes. In: ICEIS (2). S. 528-536, 2016.
- [Ma17] Mazzola, L. et.al: FCE4BPMN: On-demand QoS-based optimised process model execution in the cloud. In: 2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), S. 305-314, 2017.
- [No20] Nordemann, F., Tönjes, R., Pulvermüller, E., Tapken, H.: A graph-based approach for process robustness in unreliable communication environments. In: 15th International Conference on Evaluation of Novel Approaches to Software Engineering (ENASE), 2020.
- [No22] Nordemann, F.: Modeling and Execution of Resilient Business Processes in Unreliable Communication Environments, Dissertation, <https://doi.org/10.48693/75>, 2022.
- [NTP20] Nordemann, F., Tönjes, R., Pulvermüller, E.: Resilient BPMN: Robust process modelling in unreliable communication environments. In: 8th International Conference on Model-Driven Engineering and Software Development (MODELSWARD), 2020.
- [OMG11] Object Management Group (OMG): Business Process Model and Notation (BPMN) 2.0 Specification, <https://www.omg.org/spec/BPMN/2.0/Beta2/About-BPMN/>, Stand: 23.10.2022
- [ReDo15] Respicio, A., Domingos, D.: Reliability of BPMN business processes. *Procedia Computer Science* 64, S. 643-650, 2015.
- [Ta72] Tarjan, R.: Depth-first search and linear graph algorithms. *SIAM journal on computing* 1(2), S. 146-160, 1972.
- [Va11] Van Der Aalst, W.: Process mining: discovery, conformance and enhancement of business processes, vol. 2, 2011.
- [Va13] Van der Aalst, W.: Business process management: a comprehensive survey. *ISRN Software Engineering* 2013, 2013.