

Abschlussbericht zum Verbundvorhaben

SESAM

Thema

SESAM – Entwicklung eines vollelektrifizierten Traktors

Teilvorhaben:

Umsetzung eines vollelektrifizierten Traktors – leitungsgelöst und batteriebetrieben

Zuwendungsempfänger

Technische Universität Kaiserslautern

Förderkennzeichen

01ME12123

Autor

Jochen Barthel, Marc-Alexandre Favier, Steffen Feick

Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig

Berichtsdatum

01.01.2013 – 30.04.2016

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

I	KURZDARSTELLUNG	1
1	Aufgabenstellung	1
2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	1
3	Planung und Ablauf des Vorhabens	2
4	Stand der Wissenschaft und Technik	4
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
	ERGEBNISBERICHT - EINGEHENDE DARSTELLUNG	6
1.	Erzieltes Ergebnis	6
5.1	AP-1 b): Konzeptionierung einer vollelektrischen kabel-geführten Landmaschine	6
5.2	AP-4 b): Energiemanagement des kabel-geführten Fahrzeugs	11
5.3	AP-5: Entwurf eines Mechanismus für die Leitungsführung	14
5.4	AP-6: Konzeption der elektrischen Infrastruktur	18
5.5	AP-7: Elektrische und funktionale Sicherheit	18
5.6	AP-8: Simulation und Visualisierung leitungsgebundener Maschinen	20
5.7	Projektierung und Beschaffung einer Li-Ionen Batterie zur Aufnahme am Kraftheber eines Traktors	26
6	Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses und Erfahrungen	27
7	Ergebnisse Dritter	28
8	Veröffentlichungen	29
9	Literaturverzeichnis	30

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 leitungsgebundene Maschinen in der Landwirtschaft	4
Abbildung 5.1.1 Darstellung möglicher Energieübertragungsformen	6
Abbildung 5.1.2 Struktur einer leitungsgebundenen Arbeitsmaschine (IgAM)	7
Abbildung 5.1.3 Fünf Konzepte von leitungsgebundenen Arbeitsmaschinen	8
Abbildung 5.1.4 Leitungsführung während der Feldbearbeitung	9
Abbildung 5.1.5 die vier ausgewählten Konzepte von leitungsgebundenen Arbeitsmaschinen	10
Abbildung 5.2.1 Funktionsebene des Energiemanagements der kabel-geführten Landmaschine	11
Abbildung 5.2.2: Struktur der Wandlerregelung mit Vorsteuerung und nachgeschalteter PID-Regelung	11
Abbildung 5.2.3: Regelungsstruktur eines modularen DC/DC-Wandlers mit gemeinsamen Regler und phasenverschobener Stellgrößenaufschaltung	12
Abbildung 5.2.4: Simulationsergebnisse des geregelten modularen DC/DC-Wandlers mit Lastsprüngen	12
Abbildung 5.2.5: Startroutine eines modularen DC/DC-Wandlers	13
Abbildung 5.3.1 Leitungsführungssystem am vorderen Hubwerk: ohne und mit Gehäuse (Grafik: Baßler, Firma Hartmann&König)	14
Abbildung 5.3.2 Unterschiedliche Ausleger für verschiedene Arbeitsbreiten: 3 m, 6 m und 12 m	14
Abbildung 5.3.3 Berücksichtigung des Sichtfeldes des Fahrers bei der Entwicklung von leitungsgebundenen Arbeitsmaschinen	14
Abbildung 5.3.4 Zustandsdiagramm zur Steuerung der Leitungsführung	15
Abbildung 5.3.5 Eingrößen-PID-Regler	16
Durch den Einsatz eines Mehrgrößen-PID-Regler (vgl. 5.3.5.6), welcher zu der Fahrzeuggeschwindigkeit noch die befahrene Strecke berücksichtigt, konnte die Leitungsablage weiter verbessert werden.	17
Abbildung 5.3.7 Mehrgrößen-PID Regelung	17
Abbildung 5.3.8 Ergebnisse der Cosimulation bei Mehrgrößen-PID-Regelung	17
Abbildung 5.4.1 HVDC-Übertragungsstrecke mit modularen DC/DC-Wandlern	18
Abbildung 5.5.1: Isolierte HVDC-Leitung mit Isolations- und PE-Überwachung	19
Abbildung 5.6.1 Strategie zur Simulation von leitungsgebundenen Arbeitsmaschinen	20
Abbildung 5.6.2 Model einer leitungsgebundenen Landmaschine in Simulink	21
Abbildung 5.6.3 Kinematisches Modell des Fahrzeugs	21
Abbildung 5.6.4: Funktion der hängenden Leitung als Kettenlinie [13]	22
Abbildung 5.6.5 $t=3.32;x_0=4.0, a=1.3, FH=1.33N$ // $t=3.44: x_0=3.9, a=1.9, FH=1.87N$ // $t=3.7: x_0=1.6,$ $a=13, FH=13N$;	22
Abbildung 5.6.6 Simulation der IgAM2 mithilfe von Simulink und SimMechanics Explorer	23
Abbildung 5.6.7 Leitungsmodell der IgAM2 in 3ds max	23
Abbildung 5.6.8 Simulation mit 3dsmax	24
Abbildung 5.6.9 Auftretende Effekte während der ersten Versuchen. Die Kontaktkräfte zwischen der ersten Lage und der Trommel sind ungünstig.	24
Abbildung 5.6.10 Ab- und Aufwickeln mit der Software MSC-Adams	24
Abbildung 1.3.5 Simulation der IgAM2 mit der Software MSC-Adams	25

I Kurzdarstellung

1 Aufgabenstellung

Das Gesamtziel des Vorhabens ist die Konzeptentwicklung zweier und Entwicklung und Bau einer Variante eines vollelektrifizierten Traktors. Bei der gebauten Variante wird der Traktor durch eine mitgeführte Batterie mit elektrischer Energie versorgt, bei der nur bis zur Konzeptentwicklung verfolgten durch ein elektrisches Kabel, welches eine Verbindung des Traktors mit dem elektrischen Netz zur allgemeinen Versorgung herstellt. Für die zweite Option wird außer für den Traktor auch ein Konzept für die Kabelinfrastruktur erstellt und für eine Vorrichtung, welche das Kabel unter Einhaltung von Sicherheits-u.a. -vorschriften in geeigneter Weise mit dem Traktor mitführt. Die Arbeiten am Beispiel von Traktoren dienen nur zum Nachweis der prognostizierten Anwendervorteile; die demonstrierten Konzepte einer Elektrifizierung des Antriebs sind aber für eine Vielzahl von Landmaschinen anwendbar.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Aus Gründen des Klimaschutzes muss weltweit bis 2050 ein nahezu vollständiger Umstieg der Energieversorgung auf Erneuerbare Energien erreicht werden. Hinzu kommt, dass angesichts einer weltweit rapide wachsenden Nachfrage nach Mineralölprodukten mindestens mit einem mittelfristig starken Anstieg der Mineralölpreise, wenn nicht mit Versorgungsengpässen zu rechnen ist. Aus beiden Gründen besteht Anlass, über den Ersatz von fossilen Energieträgern, insbesondere von Mineralölprodukten, wie den in landwirtschaftlichen Maschinen eingesetzten Dieseltreibstoff durch andere Energieträger, am besten aus erneuerbaren Quellen nachzudenken.

Elektrische Motoren sind mehr als doppelt so effizient wie Verbrennungsmotoren, in denen mehr als 55 % der Energie ungenutzt in Form thermischer Verluste entweicht. Das Verhältnis ist noch günstiger für Elektromotoren, wenn Fahrzyklen mit vielen Lastwechseln und Betrieb im Teillastbereich zugrunde gelegt werden. Deren Einsatz im Mobilitätsbereich führt bei Verwendung von elektrischer Energie aus konventionellen, mit fossiler Energie versorgten Großkraftwerken allerdings nur zu einer etwas höheren Gesamtenergieeffizienz als beim Einsatz von Diesel in Verbrennungsmotoren, da der Gewinn an höherer Effizienz durch den Einsatz von Elektromotoren durch die thermischen Verluste in den Großkraftwerken wieder fast ganz aufgezehrt wird.

Betrachtet man jedoch den Einsatz Erneuerbarer Energie aus Windkraft- oder PV-Anlagen in einem Elektromotor im Vergleich mit dem Einsatz von Biokraftstoffen in einem Verbrennungsmotor, ist die Effizienz der gesamten Energieumwandlungskette im ersten Fall ungefähr 2-3 mal so hoch wie im zweiten, da die thermischen Umwandlungsverluste in Großkraftwerken nicht zum Tragen kommen, die im Verbrennungsmotor aber schon. Dies legt im Kontext eines allgemeinen Umstiegs auf Erneuerbare Energien nahe, landwirtschaftliche Maschinen elektrisch anzutreiben.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Tabelle 1: Übersicht Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete	Meilensteine
AP-1 a) Konzeption einer vollelektischen batterie-betriebenen Landmaschine	1. Technische Spezifikation der Frontgewichtbatterie erstellt
AP-1 b) Konzeption einer vollelektrischen kabel-geführten Landmaschine	2. Konzept der elektrischen Energieübertragung erstellt 3. Detailliert spezifiziertes Konzept für das leitungsgebundenen Fahrzeug erstellt.
AP-2 Konstruktive Gestaltung des batterie-betriebenen Fahrzeugs	4. Auftragsvergabe an Fa. Kolibri Powersystems AG zum Bau der Frontgewichtbatterie 5. Auslieferung der Frontgewichtbatterie durch Colibri Energy GmbH
AP-4 b) Energiemanagement des kabel-geführten Fahrzeugs	6. Metastruktur des Energiemanagements erstellt 7. Regelung der Leistungselektronik erstellt 8. Startroutine des Energiesystems entworfen
AP-5 Entwurf eines Mechanismus für die Leitungsführung	9. Vielversprechende Mechanismen für automatische Leitungsführung entwickelt und bewertet. Mehrkörpersimulationen wurde durchgeführt
AP-6 Konzeption der elektrischen Infrastruktur	10. Konzepte für Komponenten der elektrischen Infrastruktur unter Berücksichtigung von Aspekten der elektrischen und funktionalen Sicherheit erstellt

	<p>11. Gesamtkonzept der elektrischen Infrastruktur erstellt</p> <p>12. Dimensionierung der Übertragungsleitung und Bau- raumabschätzung</p>
AP-7 Elektrische und funktionale Sicherheit	<p>13. Elektrisches Schutzkon- zept für isolations- und Erdfehler erstellt</p>
AP-8 Simulation und Visualisierung Kabel-geführter	<p>14. Analyse des Mechanismus zur Leitungsführung für reprä- sentative Arbeitszyklen durch- geführt</p> <p>15. Bewertung des Mechanis- mus zur Leitungsführung für re- präsentative Arbeitszyklen durchgeführt</p> <p>16. Aussagekräftige Visuali- sierung der mechanischen Vor- gänge umgesetzt</p>

4 Stand der Wissenschaft und Technik

Über eine Schleppleitung mit elektrischer Energie versorgte, mobile Arbeitsmaschinen wurden ab der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts bis ca. in die Mitte des 20. Jahrhunderts in der Landwirtschaft eingesetzt [1], [2]. Im Bergbau sind aktuell beispielsweise Radlader für den Untertagebau, sowie Schaufelradbagger und andere Maschinen im Tagebau mit Schleppleitungen ausgerüstet [3], [4], [5].

Die elektrische Energieübertragung erfolgt nach Stand der Technik mit dreiphasigem Drehstrom. Bei kleinen Maschinen entspricht die Übertragungsspannung der Maschinenspannung [3]. Auf größeren Maschinen sind in der Regel Drehstrom-Transformatoren angebracht, um mit höheren Übertragungsspannungen arbeiten zu können [4], [5]. Bei Radladern für den Untertagebau sind Leitungslängen bis zu 400 m üblich [3].

In der Patentanmeldung [6] wird ein modularer Hochspannungs-DC/DC-Wandler beschrieben. Der Wandler besteht aus mehreren Modulen, mit auf Primär- und Sekundärseite je einem Resonanzkondensator. Der durch die Reihenschaltung von Kondensatoren erzeugte Mittelpunkt ist auf beiden Seiten geerdet.

Aus der Recherche zu Konzepten leitungsgebundener Arbeitsmaschinen geht bereits hervor, dass eine einheitliche Struktur über verschiedene Teilsysteme definiert werden kann (vgl. **Abbildung I.1**):

- Leitung
- Leitungsspeicher
- Ausleger

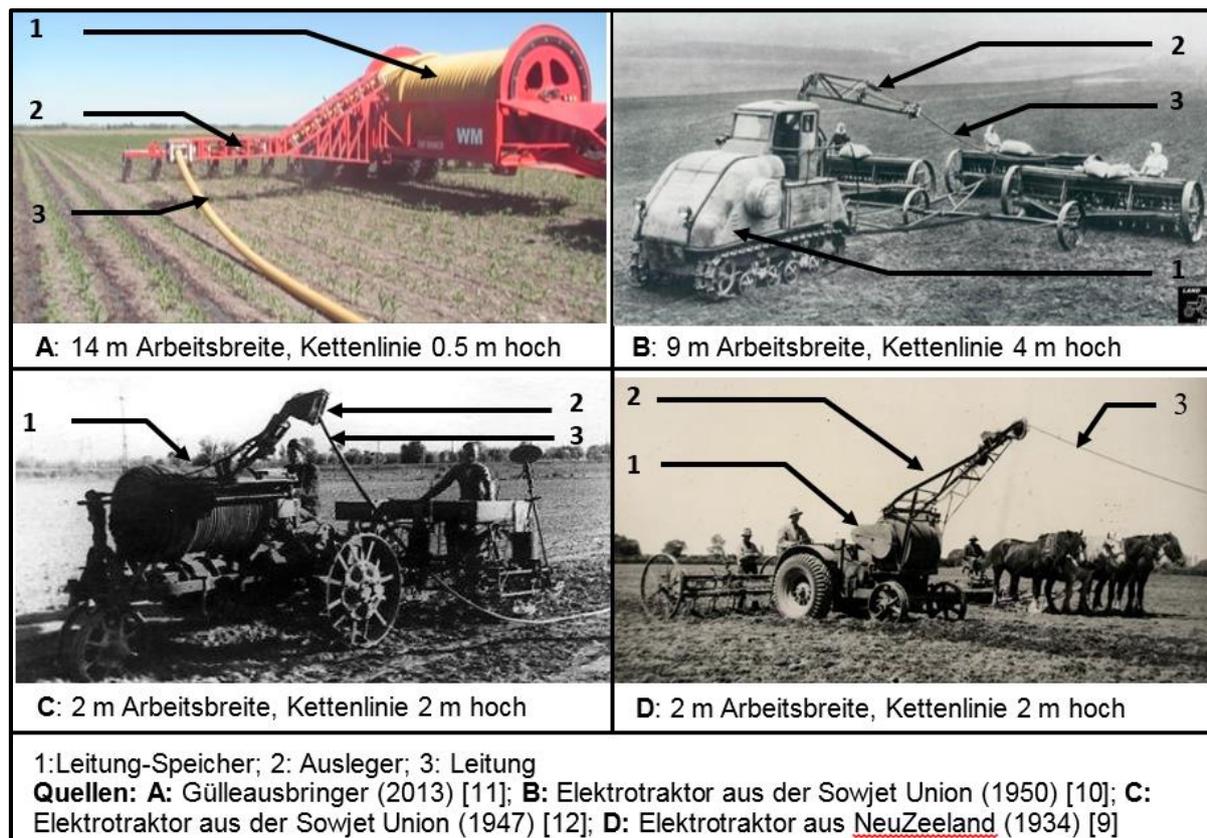


Abbildung I.1 leitungsgebundene Maschinen in der Landwirtschaft

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projekts erfolgte keine Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

Ergebnisbericht - Eingehende Darstellung

1. Erzieltes Ergebnis

5.1 AP-1 b): Konzeptionierung einer vollelektrischen kabel-geführten Landmaschine

5.1.1 Konzeption des elektrischen Energieübertragungssystems

Zur Konzeption des elektrischen Energieübertragungssystems wurden die in Abbildung 5.1.1 gezeigten, möglichen Übertragungstopologien formuliert und gegenübergestellt.

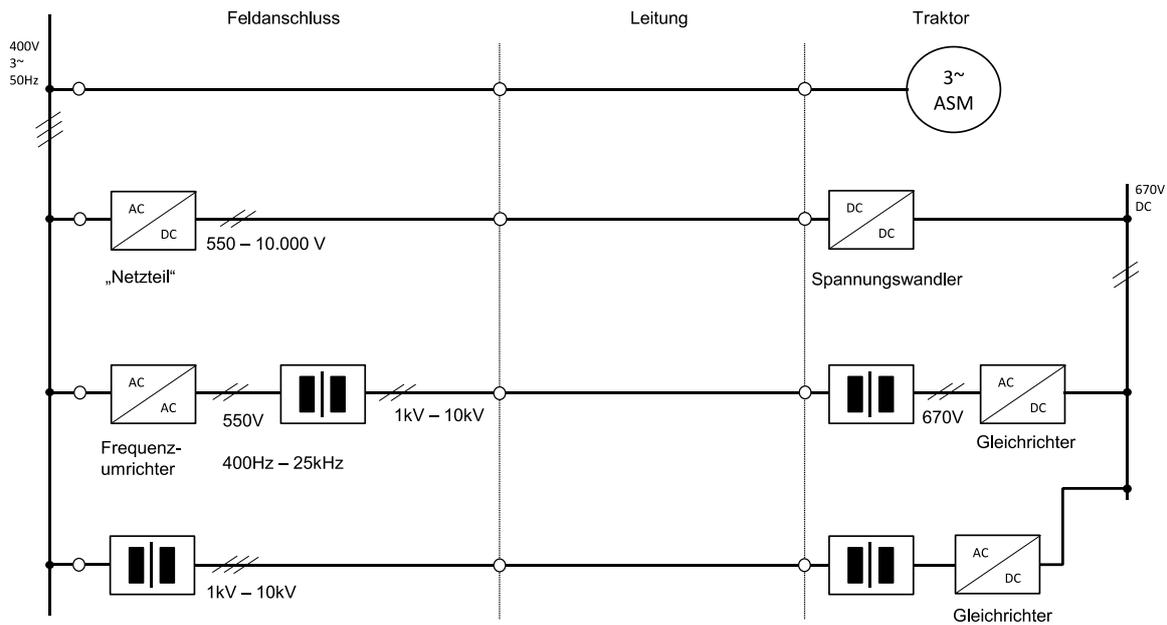


Abbildung 5.1.1 Darstellung möglicher Energieübertragungsformen

Aus den in Abbildung 5.1.1 gezeigten Topologien wurde die zweite von oben, die Hochspannungs-Gleichstrom Übertragung gewählt. Diese Form der Energieübertragung wird auch in der Energietechnik zur verlustarmen Übertragung großer Leistungen über weite Strecken eingesetzt. Gründe sind hier in erster Linie die geringen Übertragungsverluste aufgrund der hohen Übertragungsspannung, bei entsprechend kleinem Strom.

5.1.2 Konzeption leitungsgebundener Landmaschinen

5.1.2.1 Struktur leitungsgebundener Landmaschinen

Aus dem Stand der Technik im Kapitel 14 konnte eine Struktur für leitungsgebundenen Landmaschinen hergeleitet werden (vgl. Abbildung 5.1.2).

Das TMS (Tether Management System) spielt mit dem Energiemanagement eine entscheidende Rolle für die Zuverlässigkeit elektrischer leitungsgebundener Arbeitsmaschinen. Das Leitungsführungssystem besteht aus einem Leitungsspeicher und aus einem Ausleger.

Der Leitungsspeicher nimmt die Leitung auf, speichert sie und gibt sie, je nach Lage und Fahrtrichtung des Fahrzeuges, ab. Durch einen Ausleger ist die Übernahme der Leitung, deren Führung und deren gezielte Abgabe möglich.

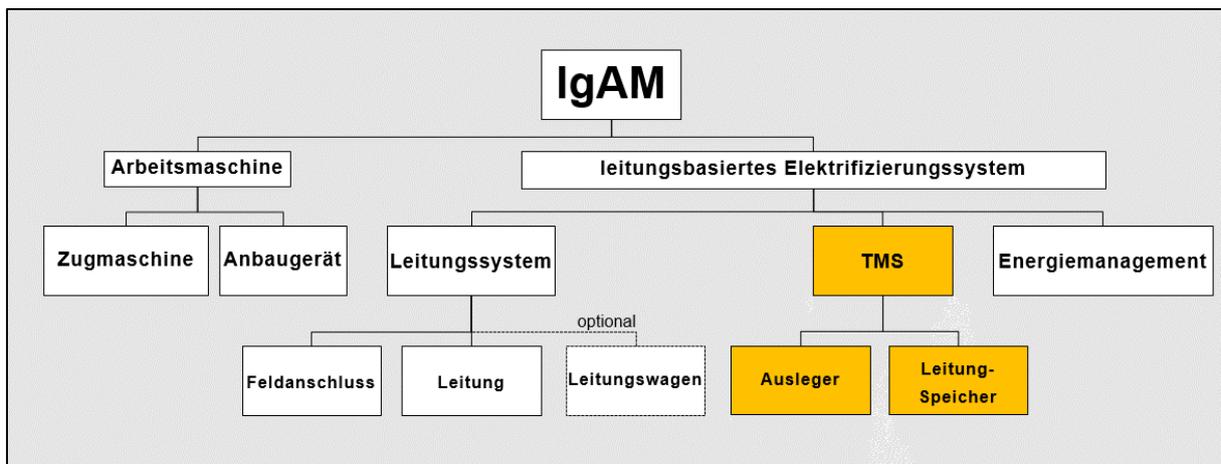


Abbildung 5.1.2 Struktur einer leitungsgebundenen Arbeitsmaschine (IgAM)

5.1.2.2 Suche nach Szenarios für den Einsatz von leitungsgebundenen Fahrzeugen

Mithilfe der Methode des morphologischen Kastens wurden fünf Einsatzszenarios für leitungsgebundenen Arbeitsmaschinen gefunden. Wie in Tabelle 5.1.1 beschrieben, sind das Traktorkonzept, die Konzepte für die Bedienung des Fahrzeuges und die Leitungsführung auf dem Feld die drei Hauptmerkmale, welche die verschiedenen Varianten unterscheiden.

Tabelle 5.1.1 Auszug aus dem Morphologischen Kasten zum Konzeptentwurf

Varianten Merkmal	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Stelle des Tether Management Systems	Innerhalb der IgAM	Außerhalb der IgAM		
Bewegung der Leitung	kreisförmig	Nur Ablage	Ablage und Aufnahme	Translatorisch
Bedienung des Fahrzeuges	Bemanntes Fahrzeug	Unbemanntes Fahrzeug		

Aus der Kombination der in Tabelle 5.1.1 aufgelisteten Varianten, wurde fünf Konzepte von leitungsgebundenen Arbeitsmaschinen (auch IgAM genannt) in Abbildung 5.1.3 skizziert. Entscheidend ist es, ob das Tether Management System (auch TMS genannt) sich außerhalb oder innerhalb der Arbeitsmaschine befindet.

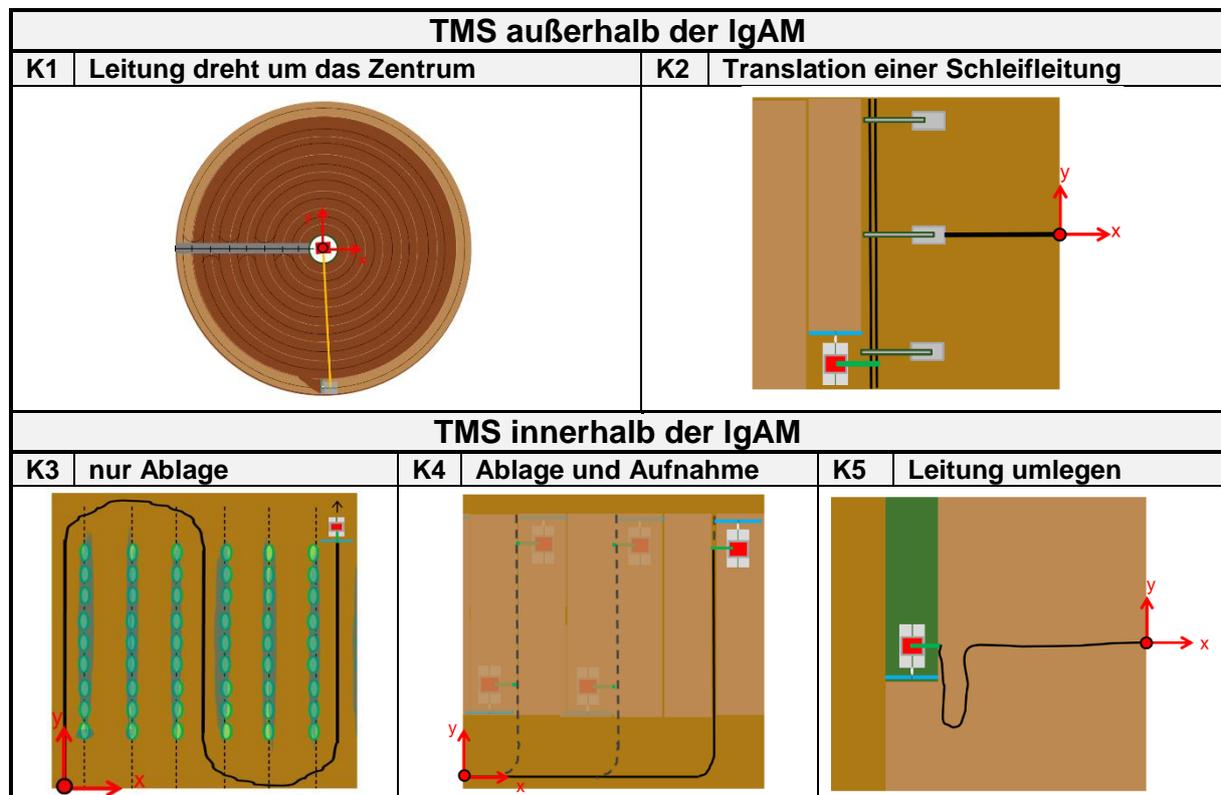


Abbildung 5.1.3 Fünf Konzepte von leitungsgebundenen Arbeitsmaschinen

Konzept 1: kreisförmiges Feld

Im Zentrum des Felds ist ein Mast aufgestellt. Die Leitung zwischen Mast und Traktor bildet eine Kettenlinie in der Luft. Damit die Leitung im Wind nicht zu stark schwingt, kann die Leitung auf einer drehbaren Plattform, ähnlich einer Struktur, die den Schlauch bei Bewässerungsanlagen für kreisförmige Felder trägt, geführt werden. Dieses Konzept ist nur bei kreisförmigen Feldstrukturen anwendbar.

Konzept 2: Translation einer Schleifleitung

Die Elektrifizierung basiert auf einer Schleifleitung, welche sich in der x-Richtung nach jedem Wendevorgang verschiebt. Während der Feldbearbeitung, ist die IgAM mit der Schleifleitung gebunden. Beim Wendemanöver fährt die IgAM im Akkubetrieb.

Konzept 3: Traktor in einer Obstbau-Anlage

Die flexible Leitung wird bei der Rückfahrt des Traktors nicht aufgewickelt, sondern weiter abgewickelt. Die Leitung wird erst im nächsten Bearbeitungsschritt, der in entgegengesetzte Richtung erfolgt, aufgewickelt. Dies funktioniert nur, wenn die Leitung für eine große Zeitdauer in der Anlage verbleiben kann und wenn die Leitung bzw. das Tether Management System vom elektrischen Traktor schnell abgekoppelt werden kann.

Konzept 4: Ablage und Aufnahme der Leitung

Der leitungsgebundene Traktor führt die Leitung in Fahrtrichtung, ohne dass die Leitung auf dem Grund reibt und eine Schlaufe hinter dem Fahrzeug bildet. Die flexible Leitung wird bei der Hinfahrt des Traktors parallel zur Fahrtrichtung abgelegt und bei der Rückfahrt aufgenommen. Dieses Konzept ist für alle möglichen Felder und landwirtschaftlichen Arbeiten geeignet.

Konzept 5: Umlegen der Leitung

Die Leitung wird gezogen und umgelegt, sie bildet mehrere Schlaufen auf dem Boden. Der Vorteil dieser Leitungsführung ist, dass keine Leitung auf dem Fahrzeug mitgeführt werden muss. Der Nachteil ist,

dass sich die Leitung durch die Reibung auf dem Boden schnell abnutzen könnte. Es ist anzumerken, dass solche Systeme besser für mit Gras begrünte Felder geeignet sind, da dort die Reibung zwischen Leitung und Boden geringer ist.

5.1.2.3 Bewertungskriterien für das Tether Management System leitungsgebundener Landmaschinen

1. Energiebedarf und Wirkungsgrad des Tether Management Systems
2. Gewicht und Auswirkung auf die Bodenverdichtung
3. leitungsschonende Eigenschaften des Systems
4. Sicherheit
5. Ästhetik
6. Ergonomie

5.1.3 Leitungsführung für das ausgewählte Konzept K4

Das Konzept K4 wurde für weitere Studien ausgewählt, weil es einen guten Kompromiss zwischen den leitungsschonenden Eigenschaften und der Ergonomie darstellt.

Um eine durchgehende und zuverlässige Energieübertragung zwischen Feldanschluss (0) und dem Traktor (3) zu gewährleisten, sind hauptsächlich drei Voraussetzungen für die Leitungsführung notwendig:

- Die Leitungsführung soll ein gutes Verhältnis zwischen der Leitungslänge und der räumlichen Einsetzbarkeit des Traktors ermöglichen.
- Die Leitungsführung soll verhindern, dass die Leitung hoher mechanischer Spannung ausgesetzt wird und zu stark auf dem Boden reibt.
- Es soll auch verhindert werden, dass die Leitung vom Traktor oder Anbaugerät überfahren wird. Dafür muss die elektrische Leitung in zwei Richtungen, X und Y, abgelegt werden. Die Strecke (1) (X-Richtung) wird während der Wendevorgänge (A) im Vorgewende abgelegt. Die Strecke (2) (Y-Richtung) wird während der Geradeausfahrt auf- und abgewickelt. Während der Wendevorgänge (B), muss keine Leitung im Vorgewende abgelegt werden. (vgl. Abbildung 5.1.4)

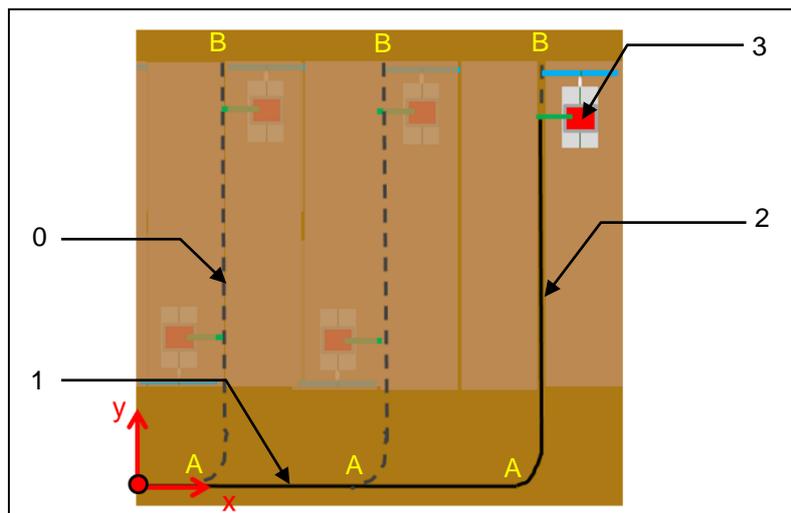


Abbildung 5.1.4 Leitungsführung während der Feldbearbeitung

5.1.4 Vier Konzepten von leitungsgebundenen Landmaschinen: IgAM1,2,3 & 4

Das in Abbildung 5.1.4 dargestellte Konzept zur Leitungsführung wurde in Verbindung mit vier leitungsgebundenen Arbeitsmaschinen weiterverfolgt (Abbildung 5.1.5).

- **IgAM 1:** die Leitungsführung wird nach Bedarf an der elektrischen Landmaschine angeschlossen. Falls die Batterie für eine bestimmte Anwendung nicht ausreichend ist, ermöglicht das Tether-Pack das ganze Feld zu bearbeiten.
- **IgAM 2:** die Leitungsführung wird an einem Wide-Span-Traktor angebracht. Dieser hat eine große Arbeitsbreite und ermöglicht einen bodenschonenden Ackerbau. (Control Traffic Farming)
- **IgAM 3:** Die Leitungsführung wird an die Energiemodule eines Knickgelenktraktors angebracht.
- **IgAM 4:** Die an einer Arbeitsmaschine angebrachte Leitungsführung versorgt eine zweite nebenfahrende Landmaschine.

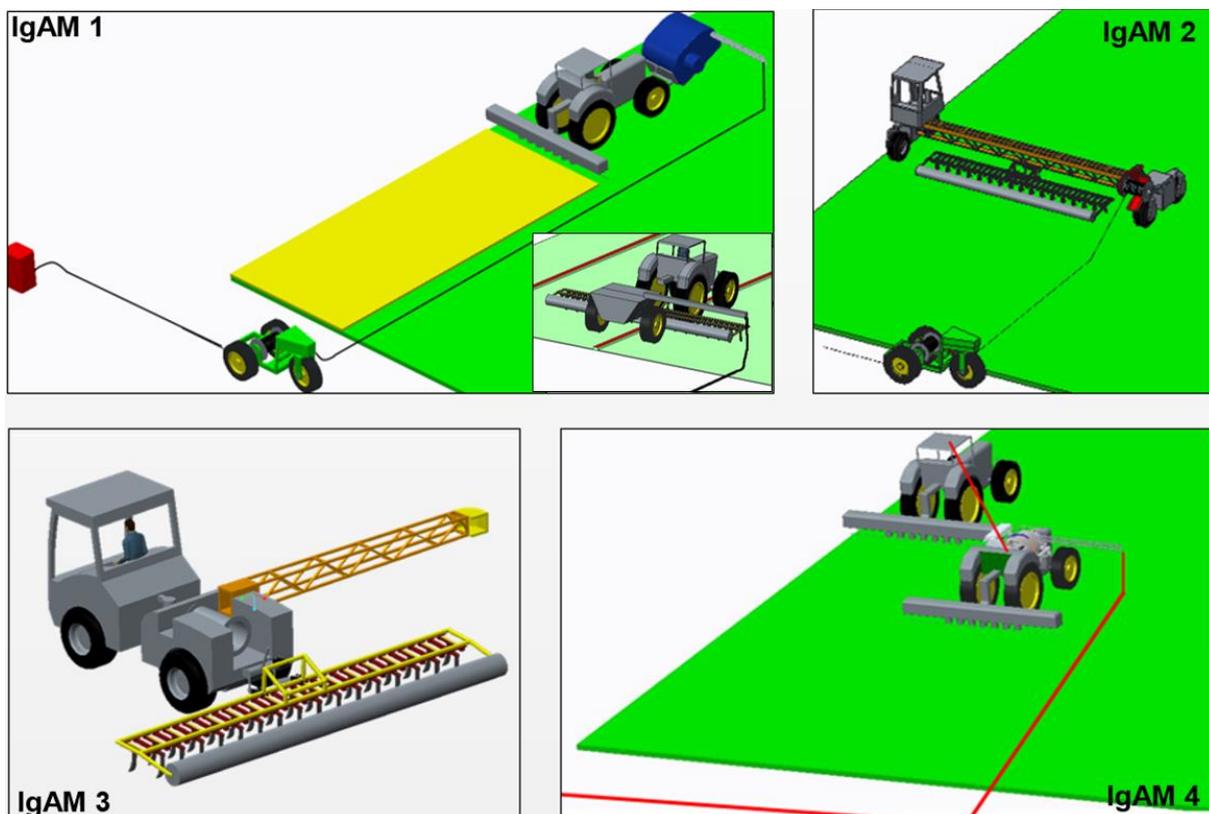


Abbildung 5.1.5 die vier ausgewählten Konzepte von leitungsgebundenen Arbeitsmaschinen

Tabelle 5.1.1 Merkmalen der vier ausgewählten Konzepte von IgAM

	IgAM1	IgAM2	IgAM3	IgAM4
Arbeitsmaschine				
Zugmaschine	Standardschlepper	Wide-Span	Knickgelenk	Master-Slave
Anbaugerät (Arbeitsbreite in m)	Kreiselegge (3 bis 8 m)	Grubber (10 m)	Grubber (3 bis 8 Meter)	2 Kreiselegge (2*8 m)
TMS				
Leitung-Speicher				
Lage des Leitung-Speichers	Am vordere Hubwerk (1-a) oder hinter dem gezogenen Anbaugerät (1-b)	An der linken Seite der Zugmaschine	Auf der Hintere Achse des Traktors	Auf dem autonomen Traktor
Ausleger				
Bodenfreiheit	1 m	1 m	1 m	1 m
konfigurierbar	ja	nein	ja	ja

5.2 AP-4 b): Energiemanagement des kabel-geführten Fahrzeugs

In **Abbildung 5.2.1** ist die Funktionsebene des Energiemanagements der kabel-geführten Landmaschine dargestellt. In dieser wird das Energiemanagement in zwei grundlegende Funktionen aufgeteilt, die

1. Regelung der Übertragungsspannung,
2. Regelung des Energieflusses über die Übertragungsstrecke.

Die erstgenannte rein spannungsstabilisierende, Regelungsaufgabe wird auf der stationären Seite, am Feldanschluss ausgeführt. Die zweite Regelungsaufgabe, die Leistungsregelung, erfolgt auf der Maschinenseite. Durch diese Organisation ist keine Kommunikation zwischen der mobilen Maschine und dem Feldanschluss erforderlich.

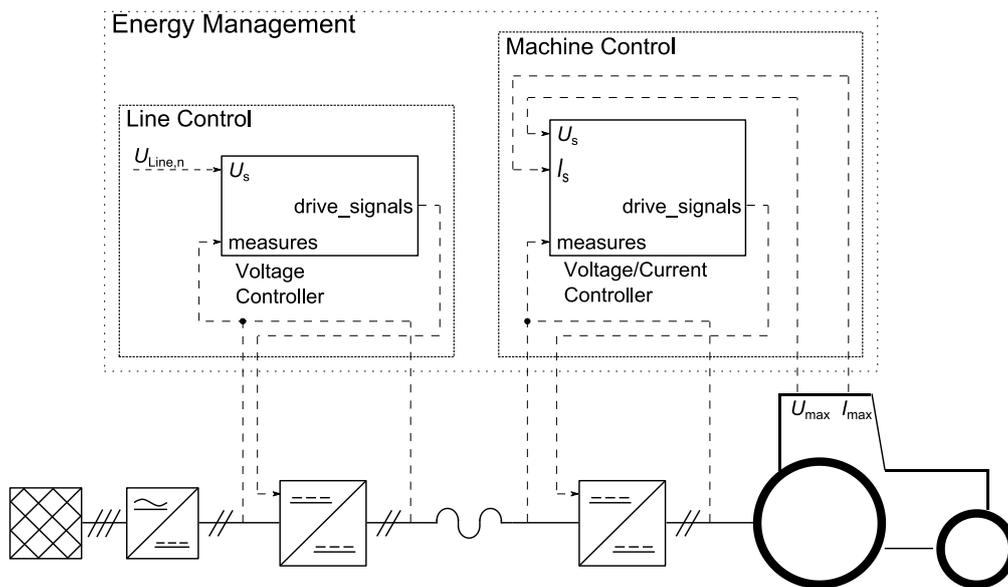


Abbildung 5.2.1 Funktionsebene des Energiemanagements der kabel-geführten Landmaschine

Die einzelnen DC/DC-Wandler-Module an den Anschlüssen der Hochspannungsleitung werden durch eine Vorsteuerung mit nachgelagerter PID-Regelung geregelt. Die Struktur ist in **Abbildung 5.1.2** gezeigt.

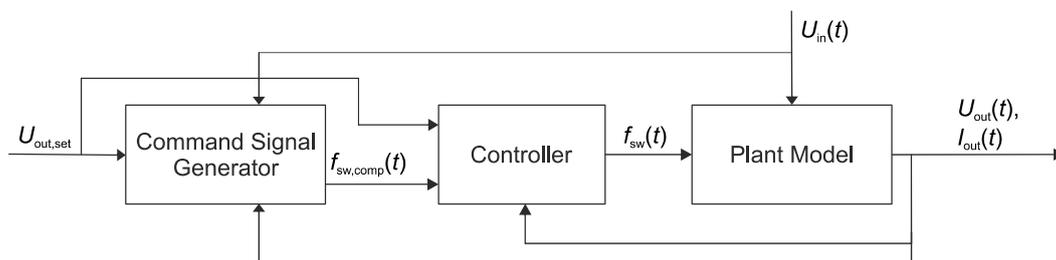


Abbildung 5.2.2: Struktur der Wandlerregelung mit Vorsteuerung und nachgeschalteter PID-Regelung

Um bei einer Verschaltung mehrerer Module eine Gesamtregelung zu erreichen, wird der in **Abbildung 5.2.3** gezeigte gemeinsame Regler eingesetzt. Dieser entspricht dem Regler eines einzelnen Moduls, mit der Anzahl der Module skalierende Größen (z.B. die Ausgangsspannung bei ausgangsseitiger Rei-

henschaltung) werden entsprechend skaliert. Alle Module werden mit der identischen, vom Regler berechneten Stellgröße beaufschlagt. Um glattere Strom und Spannungsverläufe zu erreichen werden die Stellsignale phasenverschoben auf die Module geschaltet. Der simulierte Spannungsverlauf eines so geregelten modularen DC/DC-Wandlers ist in Abbildung 5.2.4 dargestellt.

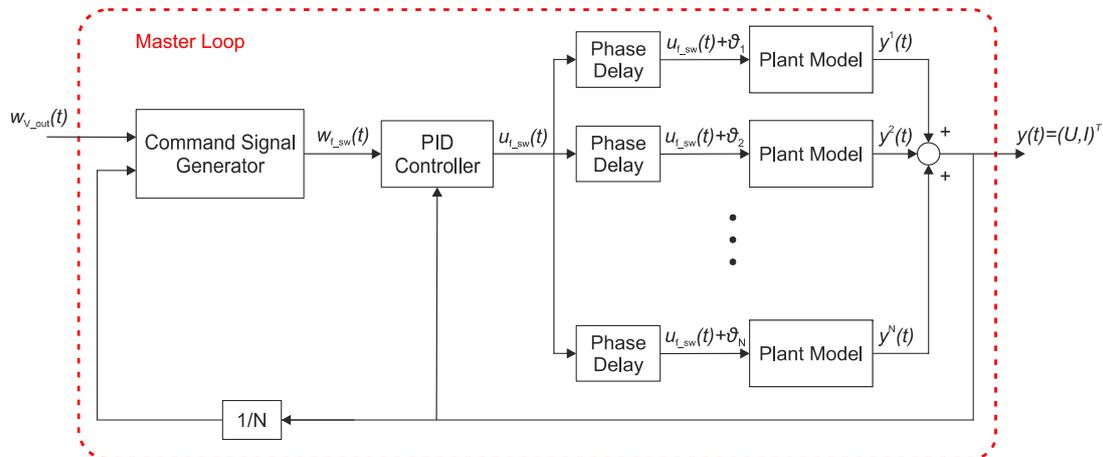


Abbildung 5.2.3: Regelungsstruktur eines modularen DC/DC-Wandlers mit gemeinsamen Regler und phasenverschobener Stellgrößenaufschaltung

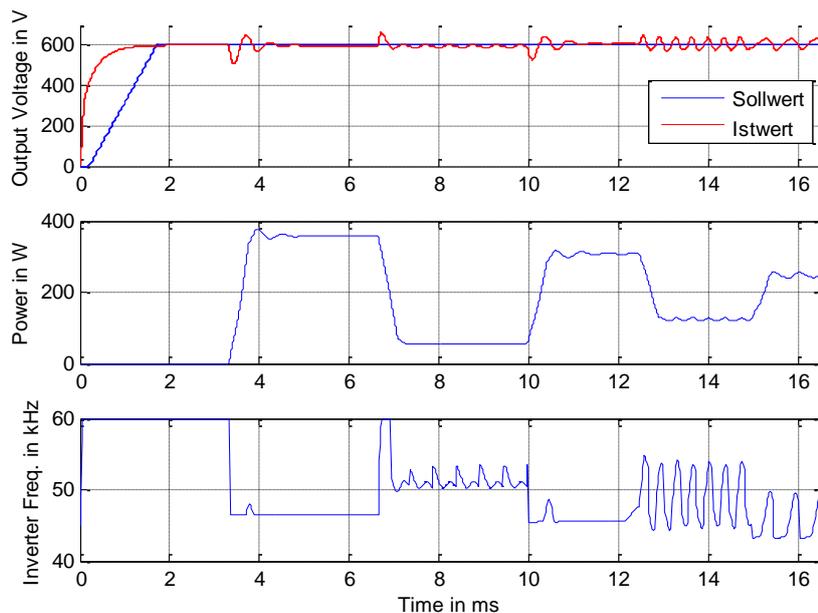


Abbildung 5.2.4: Simulationsergebnisse des geregelten modularen DC/DC-Wandlers mit Lastsprüngen

Wird ein Wandler eingeschaltet und die Sollspannung sofort auf den Nennwert gesetzt, fließen große Ströme und es kommt zu Spannungspicks. Um dem entgegenzutreten wurde eine Startroutine entwickelt, bei der die Spannung entsprechend einer Kurve, der das System ohne Überschwinger exakt folgen kann auf den Nennwert gefahren wird. Ein exaktes Folgen ist jedoch aufgrund des Systemverhaltens erst ab einer Spannung von ca. 70 % des Nennwerts möglich. Das Startverhalten eines modularen DC/DC-Wandlers ohne nachgeschaltete PID-Regelung ist in Abbildung 5.2.5 dargestellt. Im oberen Plot der Abbildung ist der Spannungsverlauf, im unteren Plot der Gesamtstrom im Gleichrichter des DC/DC-Wandlers zu sehen. Der gesamte Startvorgang benötigt 1,1 s. Es treten keine kritischen Spannungen oder Ströme auf.

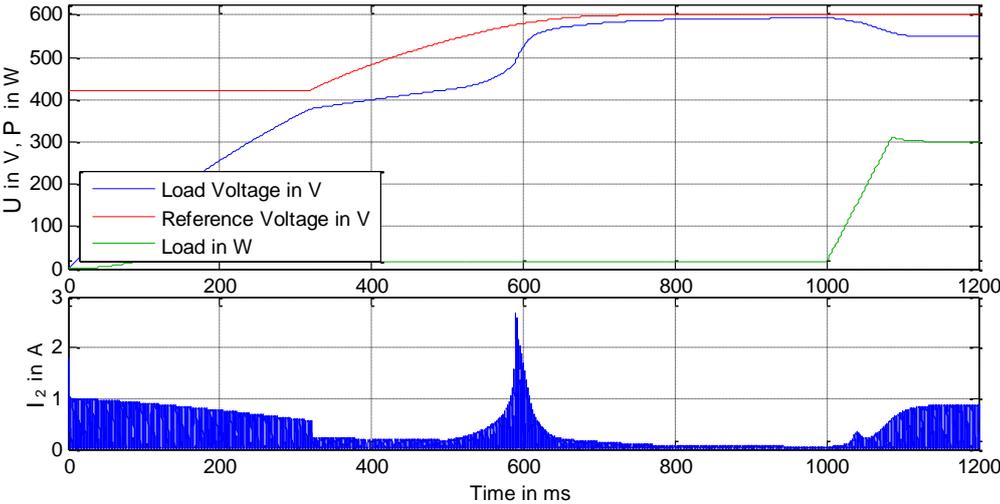


Abbildung 5.2.5: Startroutine eines modularen DC/DC-Wandlers

5.3 AP-5: Entwurf eines Mechanismus für die Leitungsführung

5.3.1 Entwickeltes System

Das entwickelte Leitungsführungssystem besteht aus einer Leitungstrommel, welche von der Firma Hartmann und König entwickelt wurde. Ein Ausleger aus Aluminium wird am Hauptgestell befestigt. Dieses ist an einer Dreipunkt-Paletten-Gabel angeschlossen.



Abbildung 5.3.1 Leitungsführungssystem am vorderen Hubwerk: ohne und mit Gehäuse
(Grafik: Baßler, Firma Hartmann&König)

Neben Funktionalitäten und Ergonomie ist die Ästhetik ein wichtiger Punkt für den Markt-Erfolg von leitungsgebundenen Arbeitsmaschinen.

5.3.2 Passenden Ausleger zum Leitungsführungssystem

Damit es möglich ist, mit mehreren Arbeitsbreiten zu arbeiten, wird das Leitungsführungssystem mit mehreren Auslegerlängen ausgestattet. (vgl. Abbildung 5.3.2)

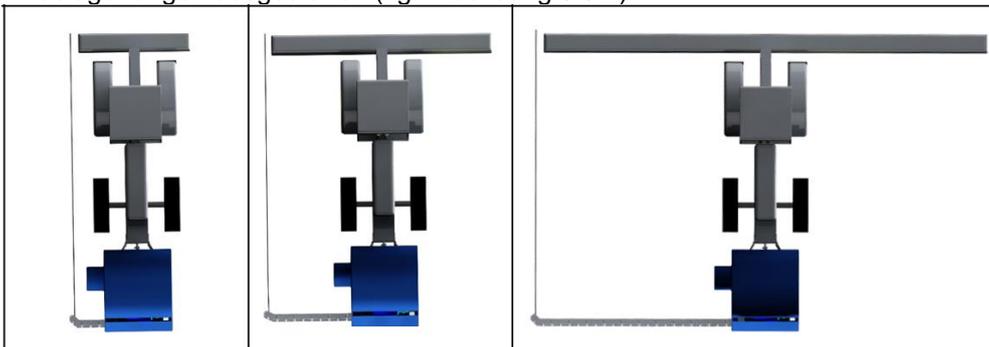


Abbildung 5.3.2 Unterschiedliche Ausleger für verschiedene Arbeitsbreiten: 3 m, 6 m und 12 m

5.3.3 Ergonomie: Berücksichtigung des Sichtfeldes des Fahrers

Die CAD-Software Creo bietet ein Zusatzmodul zur Verfügung, welches die Ergonomie-Studie eines technischen Systems unterstützt. In Abbildung 5.3.3 ist zu sehen wie die Abmessungen des Leitungsführungssystems bestimmt wurden, sodass die Umsicht des Bedieners nicht zu eingeschränkt wird.

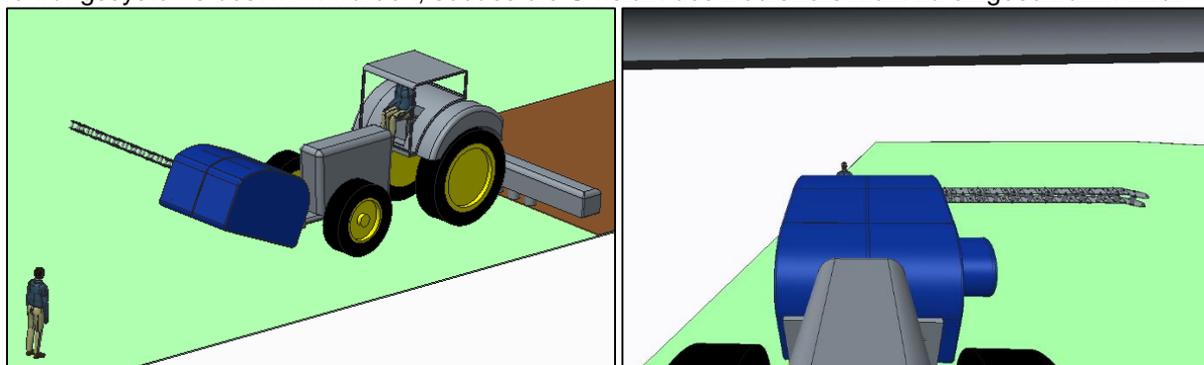


Abbildung 5.3.3 Berücksichtigung des Sichtfeldes des Fahrers bei der Entwicklung von leitungsgebundenen Arbeitsmaschinen

5.3.4 Entwurf eines leitungsschonendes Tether Management Systems: Steuerung

Das Zustandsdiagramm des Tether Management Systems in Abbildung 5.3.4 entscheidet, ob die Leitung aufgewickelt oder abgewickelt wird und stellt die Orientierung des Auslegers ein, je nach Position der Maschine auf dem Feld.

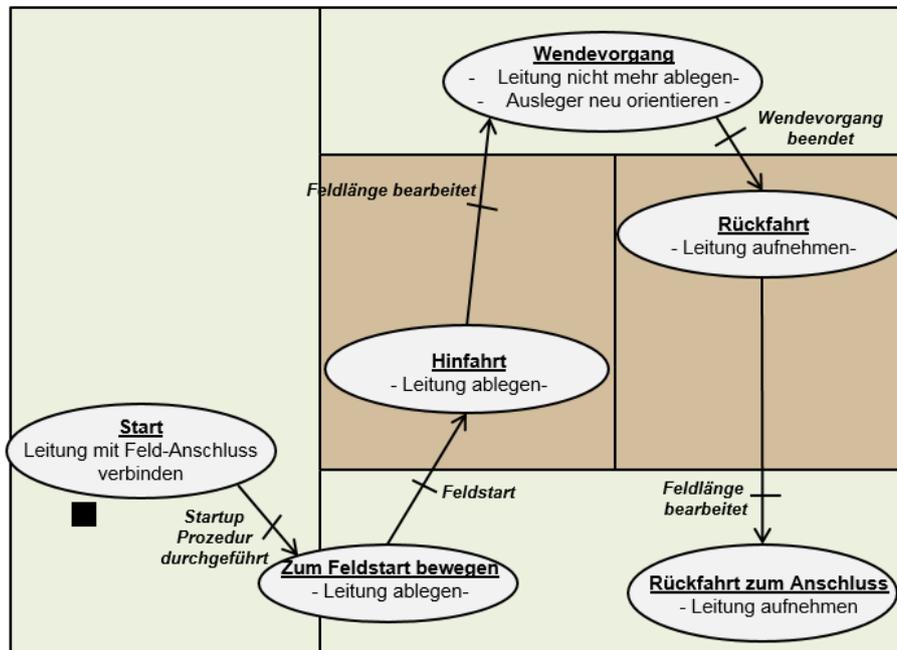


Abbildung 5.3.4 Zustandsdiagramm zur Steuerung der Leitungsführung

5.3.5 Entwurf eines leitungsschonendes Tether Management Systems: Regelung

Um die Zugkraft auf die Leitung zu minimieren, und eine längere Lebensdauer derer zu ermöglichen, wird sie nach der Position und der Geschwindigkeit der Arbeitsmaschine geregelt auf- und abgewickelt. Solche Regelkonzepte werden bereits bei den Bergbau-Ladern der Firma Atlas Copco angewendet (Scooptram EST14). Oft wird bei leitungsgebundenen Arbeitsmaschinen, wie Hafenkran oder Bergbaulader, die Leitungsführung nach der Zugkraft geregelt. Da es erwünscht ist mit einer minimalen Zugkraft die Leitung abzulegen, werden weitere Regler-Konzepte ausgedacht:

- Regelung nach der Geschwindigkeit des Fahrzeuges (vgl. Abbildung 5.3.5 und Tabelle 5.3-1)
- Regelung nach der Geschwindigkeit und der zurückgelegten Strecke. (vgl. Abbildung 5.3.8 und Abbildung 5.3.9)

- Eingrößen-PID-Regler

Während der gesamten Entwicklung und Forschung werden Mehrkörpersimulationen in MSC Adams durchgeführt, um das Leitungsverhalten zu prüfen und mithilfe verbesserter Steuer- und Regelungsstrategien die Leitungsabgabe bzw. Leitungsaufnahme zu optimieren. Ziel ist ein leitungsschonendes Management, um letztlich die Lebensdauer der Leitung und des Gesamtsystems zu erhöhen. Die Motivation an dieser Zielsetzung zu arbeiten, wurde bereits in ersten Simulationen sehr gut visualisiert. Die Leitungsabgabe wurde dabei mit einem Eingrößen-PID-Regler nach der Geschwindigkeit der Arbeitsmaschine geregelt (vgl. Abbildung 5.3.5). Die Ergebnisse unter drei verschiedenen Reglereinstellungen sind in 1.3.7.2 aufgeführt

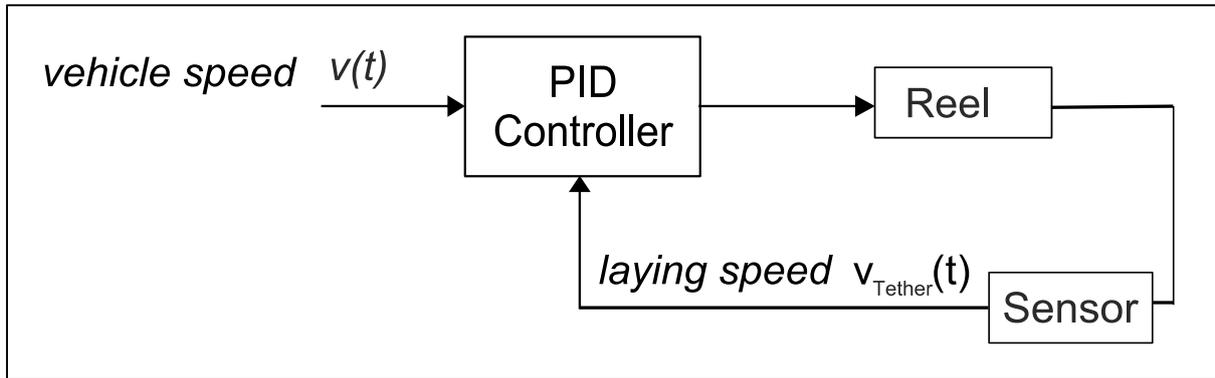
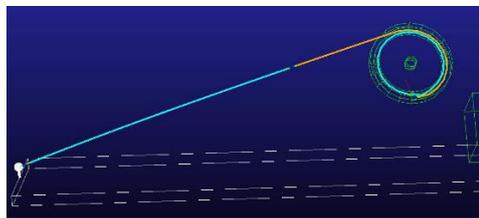
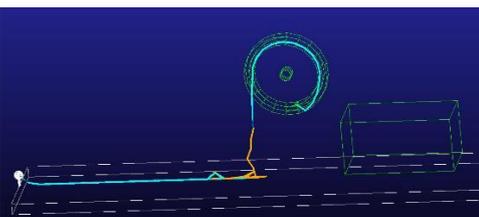
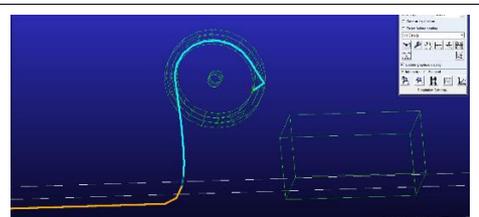


Abbildung 5.3.5 Eingrößen-PID-Regler

Tabelle 5.3-1: Leitungsverhalten unter drei verschiedenen Regler Einstellungen

Nr.	Regler-Einstellung	Spannungskraft	Visualisierung
1	$V_{Ablage} \ll V_{AM}$	zu hohe Zugkraft	
2	$V_{Ablage} \ll V_{AM}$	zu niedrige Zugkraft	
3	$V_{Ablage} \approx V_{AM}$	passende Zugkraft	

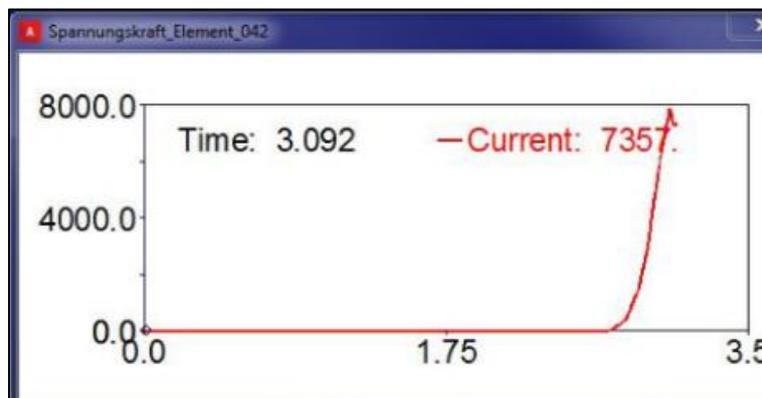


Abbildung 5.3.6: Zugkraft beim Fall N°1: $V_{Ablage} \ll V_{AM}$

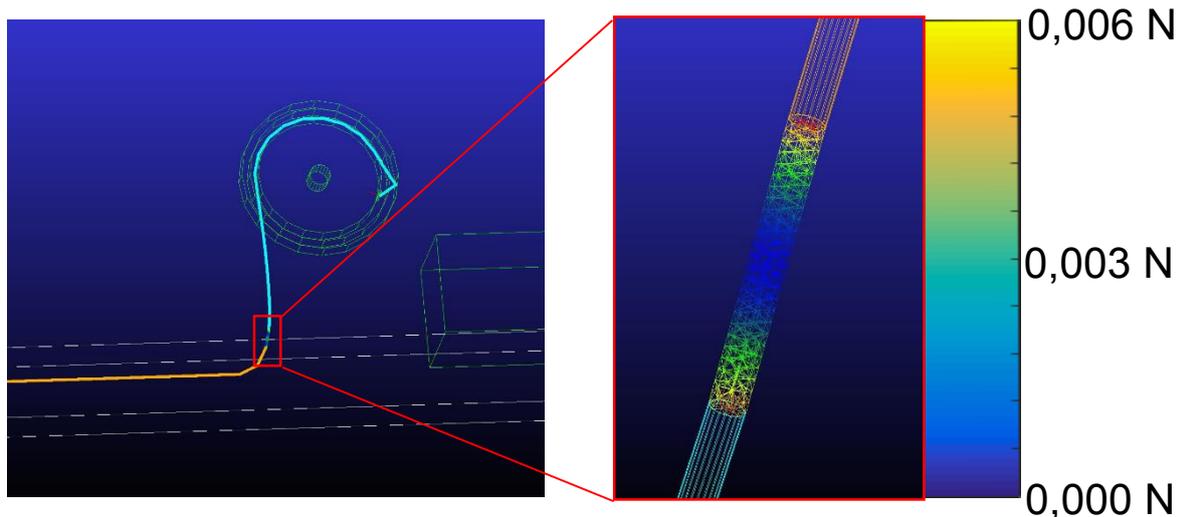


Abbildung 5.3.7 Bestimmung der Zugkraft in der Leitung durch lokale FEM Analyse an einem Glied der Leitung

Mehrgrößen-PID-Regler

Durch den Einsatz eines Mehrgrößen-PID-Regler (vgl. Abbildung 5.3.7), welcher zu der Fahrzeuggeschwindigkeit noch die befahrene Strecke berücksichtigt, konnte die Leitungsablage weiter verbessert werden.

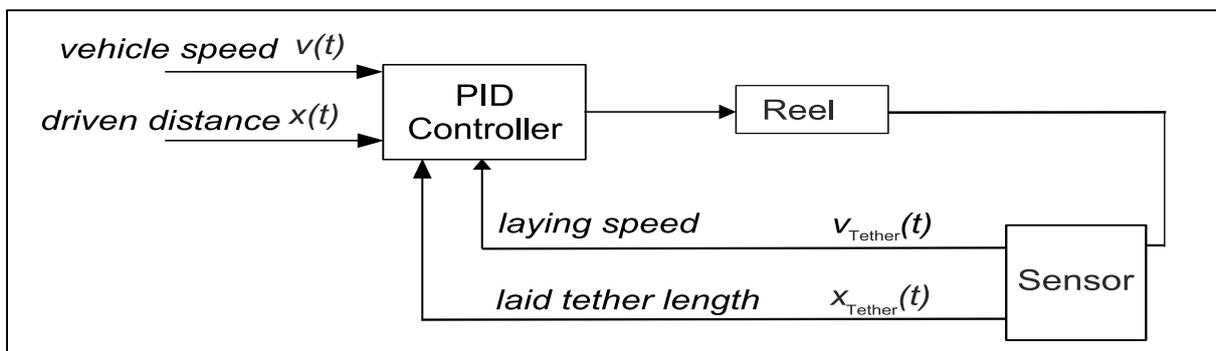


Abbildung 5.3.8 Mehrgrößen-PID Regelung

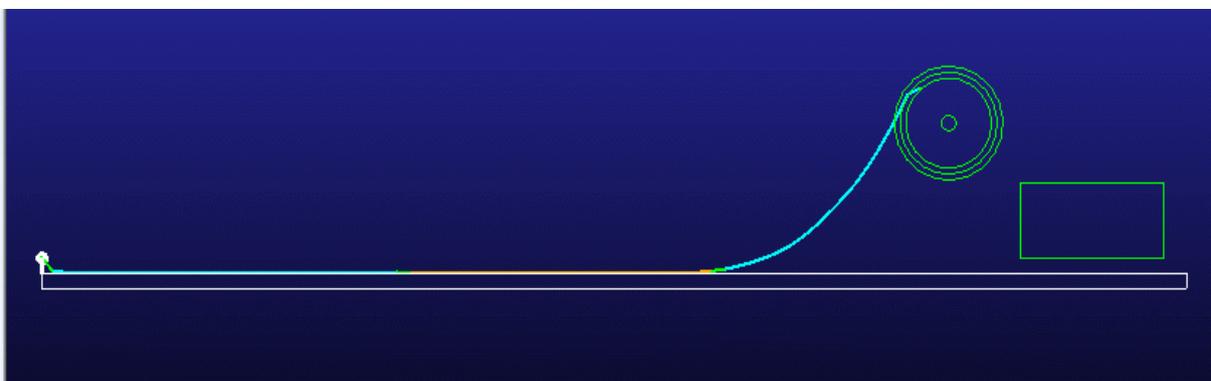


Abbildung 5.3.9 Ergebnisse der Cosimulation bei Mehrgrößen-PID-Regelung

5.4 AP-6: Konzeption der elektrischen Infrastruktur

Um die hohen Spannungen der Übertragungsleitung mit Wandlern in kompakter Bauweise erreichen und den benötigten Bauraum auf der Maschine reduzieren zu können, werden Systeme von modularen DC/DC-Wandlern, wie in **Abbildung 5.4.1** dargestellt, eingesetzt.

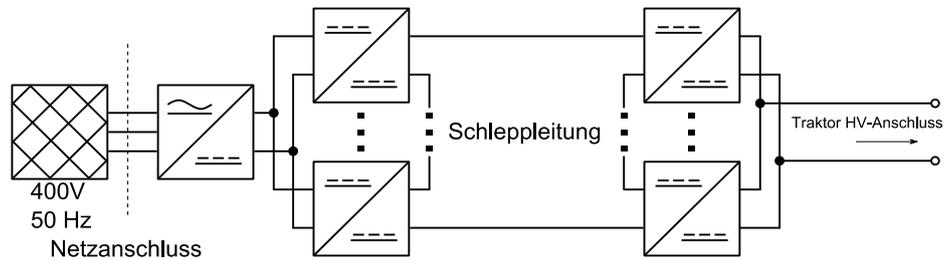


Abbildung 5.4.1 HVDC-Übertragungsstrecke mit modularen DC/DC-Wandlern

Der modulare Aufbau wirkt an der Hochspannungsseite wie ein kapazitiver Spannungsteiler. Dadurch treten an den Halbleitern keine hohen Spannungen auf, so dass schnell schaltfähige Bauteile mit geringer Spannungsfestigkeit verwendet werden können. Dies hat zur Folge, dass die Leistungselektronik kompakt gebaut werden kann.

Eingangs- und Ausgangsseiten der Wandlermodule sind durch Transformatoren galvanisch getrennt, durch Hinzufügen oder Entfernen von Modulen kann die Nennleistung und Übertragungsspannung ohne Änderungen auf Modulebene an die Anforderungen angepasst werden.

Tabelle 5.4.1: Zulässige Stromstärke gemäß DIN VDE 0298-3 bei aufgewickelter Leitung und drei belasteten Adern

Quer- schnitt	Strom bei n-lagiger Wicklung					
	0	1	2	3	4	5
25 mm ²	131 A	104,8 A	79,9 A	64,2 A	55 A	49,8 A

Der TU Kaiserslautern liegt ein Angebot über eine Schleppleitung mit Nennspannung $U_0/U = 3,6/6$ kV zum Betrieb einer Gleichstromschleppleitung vor. Die Leitung ist mit drei Adern mit je 25 mm² Querschnitt ausgeführt, davon ist eine Ader als PE-Leiter vorgesehen. Zusätzlich enthält die Leitung zwei Steuerleitungen zur Übertragung von zusätzlichen Signalen. Das Leitungsgewicht beträgt 1530 kg/km. Mit dieser Leitung sind gemäß DIN VDE 0298-3 die in Tabelle 5.4.1 gegebenen Stromstärken, abhängig von den Wickellagen zulässig. Die maximale Betriebsspannung liegt bei isoliertem DC-Betrieb bei 10,8 kV.

5.5 AP-7: Elektrische und funktionale Sicherheit

Die elektrische und funktionale Sicherheit wurde bei der Auslegung der Systemarchitektur bereits berücksichtigt. Durch die galvanisch isolierte Implementierung des Hochspannungsteils müssen mindestens zwei Isolationsfehler auftreten, um den Stromkreis fehlerhaft zu schließen. Der Isolationszustand eines solchen IT-Systems (isolé terre) ist allerdings messbar. Zur Erhöhung der funktionalen Verfügbarkeit des Systems können mehr Wandlermodule als notwendig verbaut werden. Im Fall eines Ausfalls eines Moduls wird eines der zusätzlichen Module zugeschaltet, sodass das System voll verfügbar bleibt. Fallen mehr Module aus als zusätzlich vorhanden sind, kommt es zu keinem Komplett-Ausfall der Maschine, da das Energieübertragungssystem mit reduzierter Leistung weiter betreiben werden kann.

5.6 AP-8: Simulation und Visualisierung leitungsgebundener Maschinen

5.6.1 Ziel der Simulation

Die Simulation leitungsgebundener Arbeitsmaschinen bietet die Möglichkeit:

- die entwickelten Konzepte zu erproben und die Teile konstruktiv ändern, wenn nötig
- die Steuerung und Regelung der Leitungsführung zu entwerfen
- die Führungsvorrichtungen auszulegen (Bestimmung der notwendigen Führungsrollen und deren Abstände)

5.6.2 Konzept zur Simulation und Visualisierung von IgAM

Die Grundlage aller Simulationen bildet ein Simulationsmodell in Simulink. (vgl. **Abbildung 5.6.1**)

Mithilfe kinematischer Simulationen sowie dessen Visualisierung im SimMechanics Explorer ist es möglich, die untersuchte Strategie des Leitungsmanagements zu beurteilen und zu verbessern, in dem z.B. der Pfad der Landmaschine, die Ablagegeschwindigkeit der Leitung und/oder die Position des Leitungsauslegers angepasst werden können. (vgl. **Abbildung 5.6.1** , 1.)

Zur besseren Visualisierung werden anschließend Simulationen in einer „physics-engine“-Software durchgeführt werden. Die eingesetzte Software für die ersten dynamischen Simulationen ist Autodesk 3ds Max. Diese liefern bereits nach wenigen Minuten plausible Ergebnisse und animieren diese in einer wesentlich genaueren Darstellung. (vgl. **Abbildung 5.6.1** , 2.)

Letztlich ermöglichen Co-Simulationen zwischen Simulink und einer MKS-Software, (Adams) eine sehr genaue Abstimmung der Steuerung des Leitungsmanagements. Allerdings können die vollständigen Ergebnisse dieser Simulationen erst nach einer Simulationsdauer von mehreren Tagen eingesehen werden. Aus diesem Grund sollte eine Auswahl des Leitungsmanagements erfolgt und mithilfe der kinematischen Simulationen bereits überprüft worden sein. (vgl. **Abbildung 5.6.1** , 3.)

Der Vergleich beider dynamischen Simulationen offenbart, dass die wesentlich aufwendigere Simulation mithilfe der MKS-Software deutlich mehr Rechendauer beansprucht. Der Grund hierfür liegt in den verschiedenen Modellierungsarten der Kontakte der Leitungselemente. Während in der MKS-Software die Kontakte über die „penalty-based“-Methode modelliert werden, nutzt die physics-engine-Software die „constraint-based“-Methode.

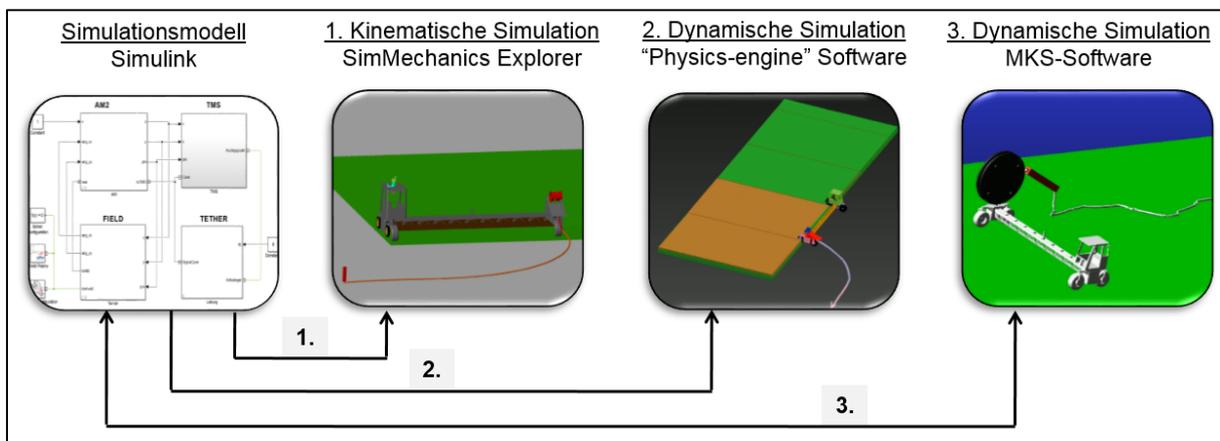


Abbildung 5.6.1 Strategie zur Simulation von leitungsgebundenen Arbeitsmaschinen

5.6.3 Simulation mit Matlab-Simulink

An die Steuerungsstrategie des Leitungsmanagements werden zwei Hauptanforderungen gestellt. Zum einen darf das Ablegen sowie die Aufnahme der Leitung die Feldbearbeitung nicht behindern, zum anderen sollte die Leitung vor Beschädigungen geschützt werden. Um beides sicherzustellen, ist das Leitungsmanagement-System (TMS) in ein Modul zur Ablaufsteuerung (Management-Ebene) und ein Regelungsmodul (Prozess-Ebene) aufgeteilt. (vgl. Abbildung 5.6.2)

Die Ablaufsteuerung in der Management-Ebene erfolgt in einer State-Machine. Diese entscheidet in Abhängigkeit der Position der Landmaschine und dessen Weiterfahrt, ob die Leitung ab- oder aufgewickelt werden muss und positioniert den Leitungsausleger. (vgl. Abbildung 5.3.4)

Auf der Prozessebene regelt ein multivariabler PID-Regler das ab- und aufwickeln der Leitung nicht nur in Abhängigkeit der Arbeitsgeschwindigkeit, sondern auch unter Einbeziehung der bereits zurückgelegten Strecke. (vgl. Abbildung 5.3.5 und Abbildung 5.3.8)

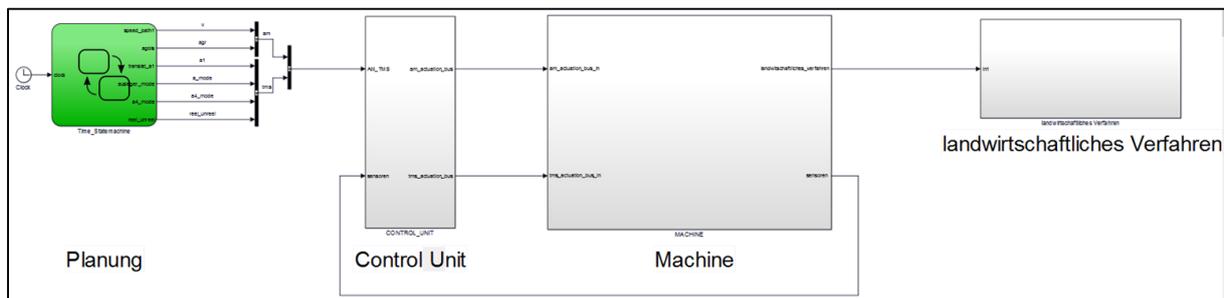


Abbildung 5.6.2 Model einer leitungsgebundenen Landmaschine in Simulink: Ablaufsteuerung (grün markiert) und Regelung.

5.6.3.1 Modellierung der Maschine

- **Modellierung des Fahrzeuges**

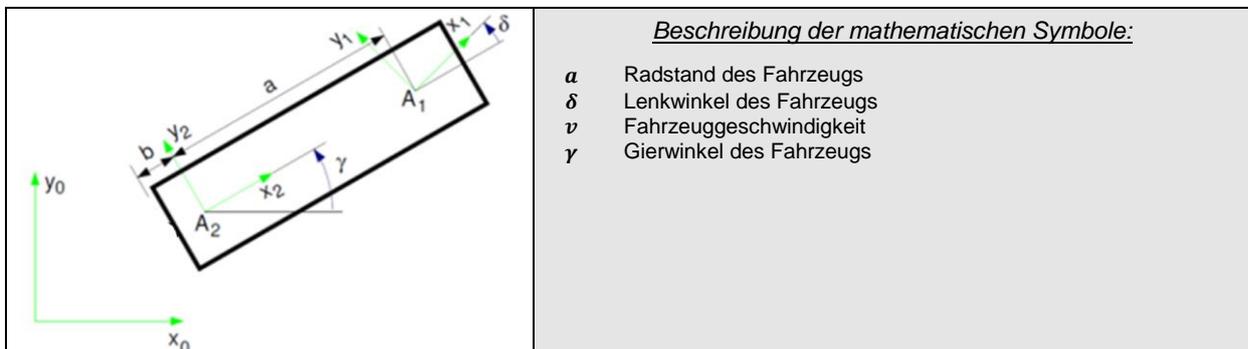


Abbildung 5.6.3 Kinematisches Modell des Fahrzeuges

Die Bewegungen des Fahrzeuges in beide Richtungen sowie die Änderung des Gierwinkels lassen sich zunächst durch folgende Gleichung beschreiben:

$$\dot{x} = v \cdot \cos(\gamma) \quad (2.1)$$

$$\dot{y} = v \cdot \sin(\gamma) \quad (2.2)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{a} \cdot \tan(\delta) \quad (2.3)$$

- **Modellierung der Leitung**

Während der Bewegung der Arbeitsmaschine bei der Feldbearbeitung mit einer konstanten Arbeitsgeschwindigkeit und unter der Annahme von niedrigen Beschleunigungsraten kann die dynamische Last auf die Leitung vernachlässigt werden. Dadurch kann die hängende Leitung in der vertikalen Ebene x-

z als Kettenlinie unter statischer Last (Eigengewicht) modelliert werden, die von einem Punkt A1 am Leitungsausleger ausgeht und den Boden schließlich im Punkt P1 berührt. (s. Abbildung 5.6.4)

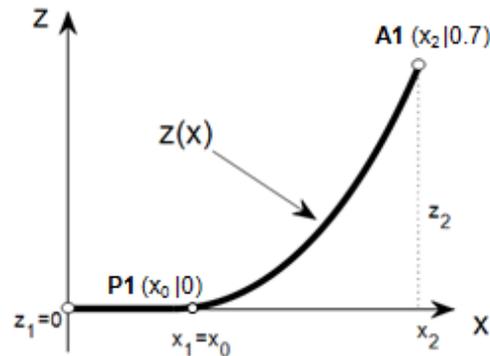


Abbildung 5.6.4: Funktion der hängenden Leitung als Kettenlinie [7]

Mathematisch kann die hängende Leitung also wie folgt bestimmt werden [7]

	$z(x) = \begin{cases} -a + a \cdot \cosh\left(\frac{x-x_0}{a}\right), & x \geq x_0 \\ 0, & x \leq x_0 \end{cases}$	1.5
	$L(x) = x_0 + a \cdot \sinh\left(\frac{x_2-x_0}{a}\right)$	1.6
Dabei beschreibt der Parameter a den skalaren Faktor der Kettenlinie:		
	$a = \frac{F_H}{q}$	1.7

In Abhängigkeit der neuen Positionen von Punkt A1 und Punkt P1, wird während der Simulation für jeden Schritt eine neue Kettenlinie berechnet.

Die bereits abgelegte Leitung kann mathematisch nach dem „Last in First out“ - Prinzip behandelt werden. Beim Aufwickeln der abgelegten Leitung werden die Elemente abhängig von der horizontalen Länge der hängenden Leitung (Kettenlinie) nach dem genannten Prinzip (LIFO) aus den Daten gelöscht. Zur Vereinfachung ist der Reibungskoeffizient zwischen der abgelegten Leitung und dem Boden als unendlich angenommen.

Abbildung 5.6.5 zeigt wie das kinematische Modell auf eine zu hohe Regelabweichung reagiert. Die Leitung wird mehr gezogen, die Kettenlinie wird länger. Schließlich wird die Position der Leitung auf dem Feld stark von der gewünschten Position abweichen. (vgl. Abbildung 5.6.6)

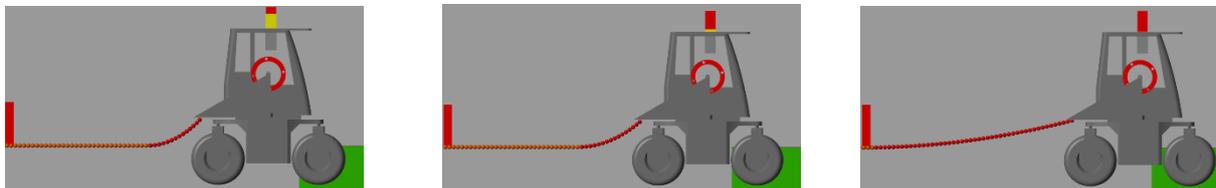


Abbildung 5.6.5 t=3.32: x0=4.0, a=1.3, FH=1.33N // t=3.44: x0=3.9, a=1.9, FH=1.87N // t=3.7: x0=1.6, a=13, FH=13N;

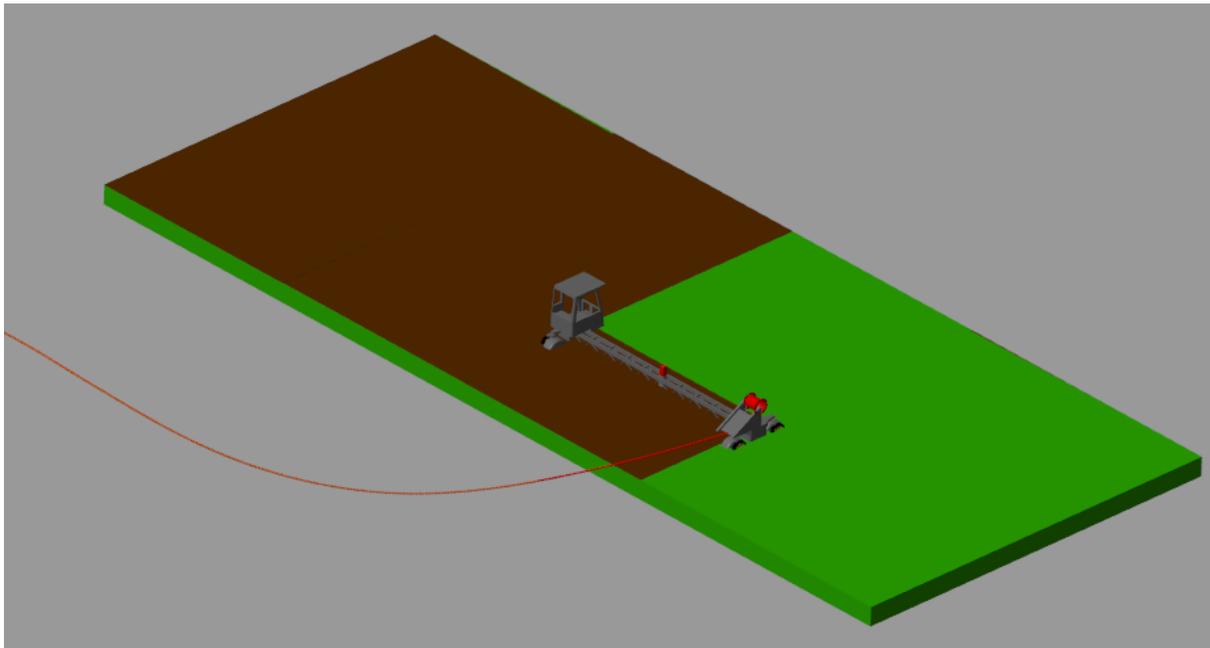


Abbildung 5.6.6 Simulation der IgAM2 mithilfe von Simulink und SimMechanics Explorer

5.6.4 Simulation mit 3dsmax

In der physics-engine-Software wird die Leitung als eine Kette von mehreren, starren Körpern modelliert. Diese werden jeweils über ein reibungsloses Kugelgelenk verbunden. In dem Modell besitzen die einzelnen Leitungselemente eine Länge von 0,2 m und eine Masse von 0.2 kg (vgl. Abbildung 5.6.7 und Abbildung 5.6.8)

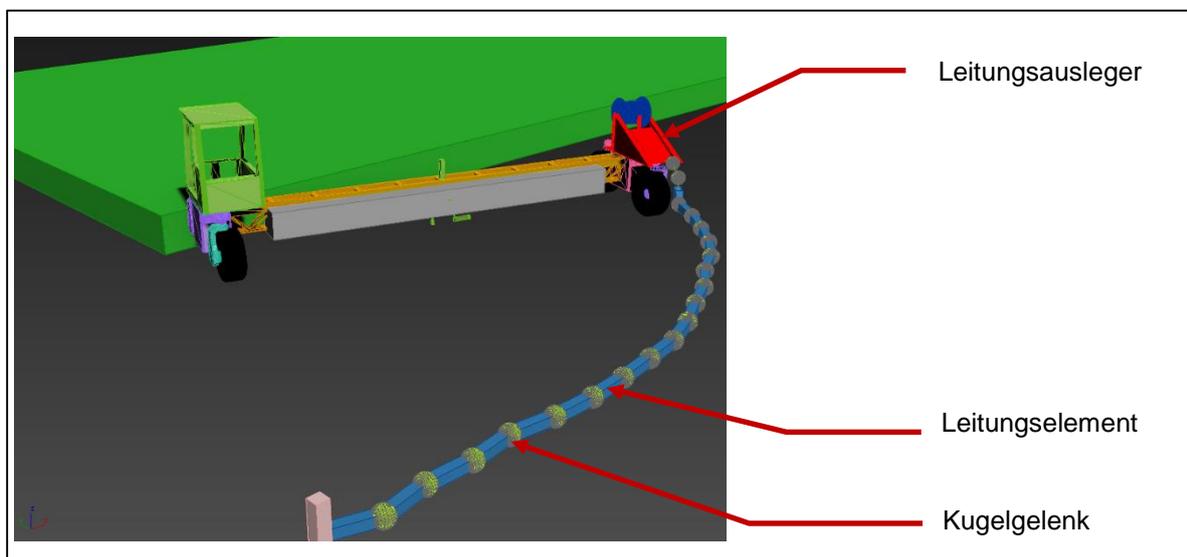


Abbildung 5.6.7 Leitungsmodell der IgAM2 in 3ds Max

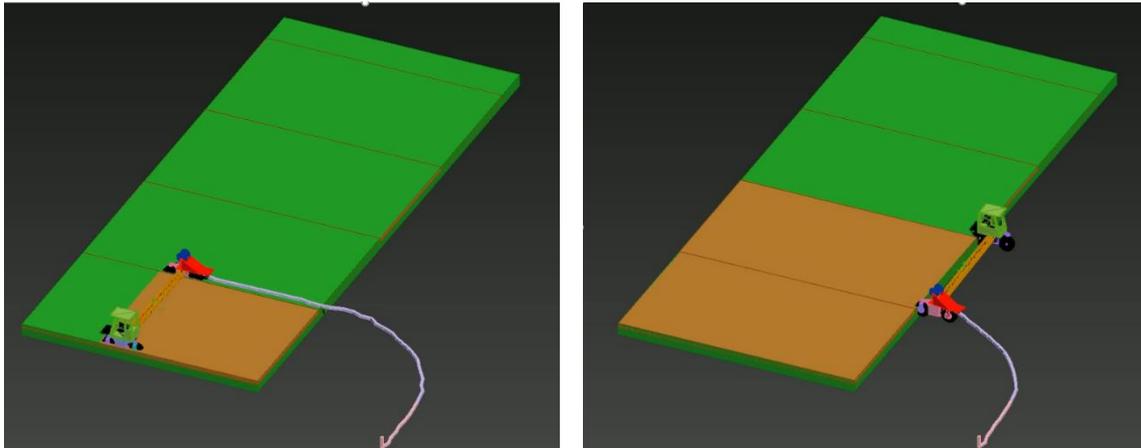


Abbildung 5.6.8 Simulation mit 3dsmax

5.6.5 Mehrkörpersimulation mithilfe der Software Adams

Mittels Adams wird die flexible Leitung in Massen-Elemente zerteilt. Jedes Element ist miteinander über gelenke verbunden. An jedem Gelenk sind eine Dämpfung und eine Steifigkeit zugewiesen. Zwischen der erste Lage und der Trommel, und zwischen zwei benachbarten Lagen, ist es wichtig die passende Kontaktkraft auszuwählen. (vgl. Abbildung 5.6.9)

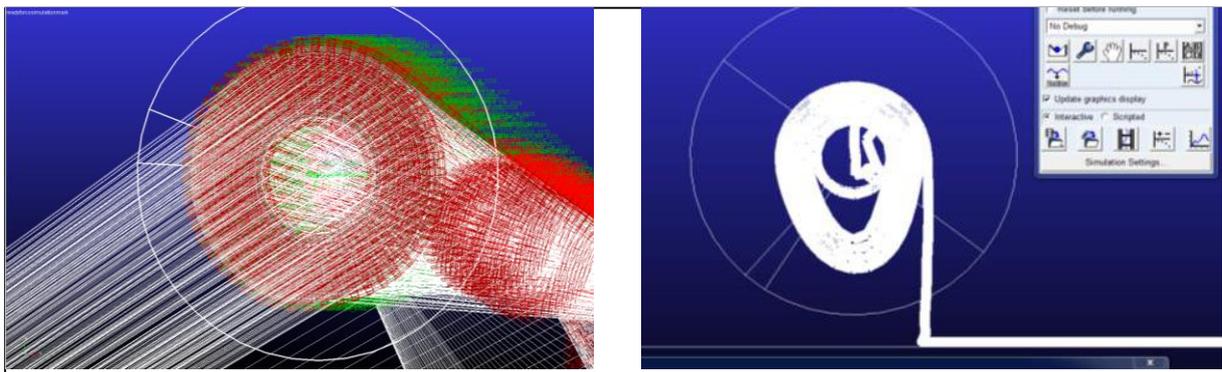


Abbildung 5.6.9 Auftretende Effekte während der ersten Versuche.
Die Kontaktkräfte zwischen der ersten Lage und der Trommel sind ungünstig.

Nach der kinematischen Simulation in Simulink (Abbildung 5.6.6) und der dynamischen Simulation in 3ds Max (vgl. Abbildung 5.6.8), wird die Leitungsgebundene Maschine IgAM2 in Adams simuliert. Es ist dann möglich die Ergebnisse der verschiedenen Simulationen zu vergleichen (vgl. Abbildung 5.6.10 und Abbildung 5.6.11). Solange die Leitungsführung nicht optimal ist werden Änderungen an der TMS- Steuerung bzw. an der TMS-Regelung vorgenommen.

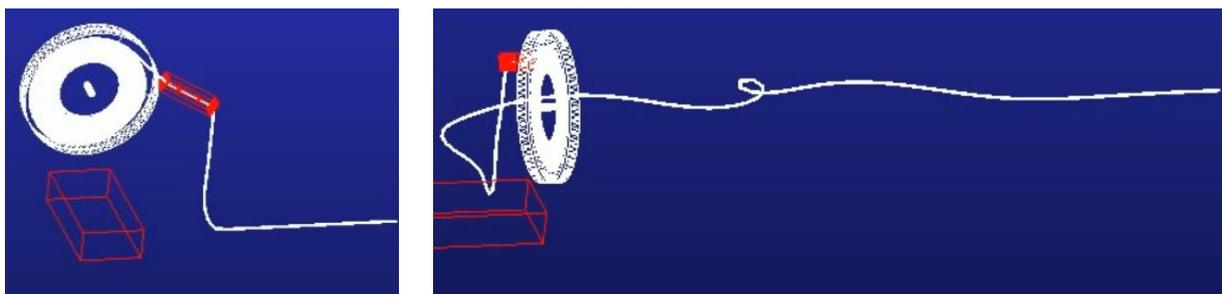


Abbildung 5.6.10 Ab- und Aufwickeln mit der Software MSC-Adams

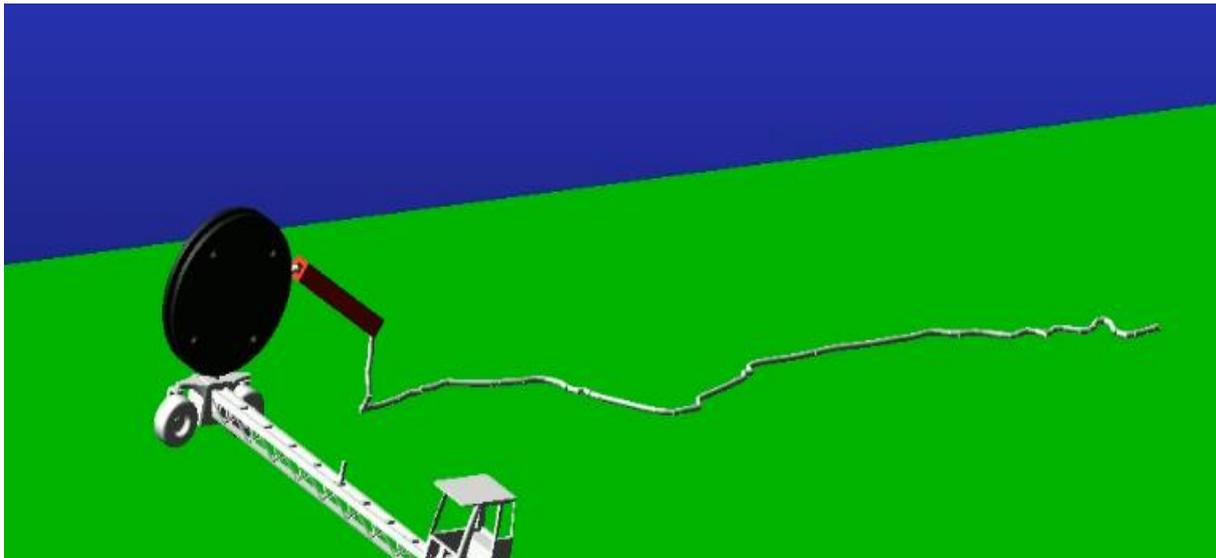


Abbildung 5.6.11 Simulation der IgAM2 mit der Software MSC-Adams

5.6.6 Vergleich der verschiedenen Simulationswerkzeugen

Die in Simulink durchgeführte kinematische Simulation ist schneller als die dynamische Simulation. Der Vergleich beider dynamischen Simulationen offenbart, dass die wesentlich aufwendigere Simulation mithilfe der MKS-Software deutlich mehr Rechendauer beansprucht. (vgl. **Abbildung 5.6.1**)

Grundsätzlich ist es bei dynamischen Simulationen sinnvoll, einen nützlichen Kompromiss zwischen der anwenderfreundlichen Komplexität des Modells und der Effizienz der Rechenzeit auf der einen Seite und der Genauigkeit der Darstellung auf der anderen Seite zu finden. Aus diesem Grund wird im Hinblick auf die eigentliche Thematik, der Untersuchung des Leitungszustands und des Leistungsverhaltens, die landwirtschaftliche Arbeitsmaschine weiterhin kinematisch betrachtet, während nun die Leitung vollständig dynamisch modelliert wird.

Tabelle 5.6.1: Vergleich der verschiedenen Simulationswerkzeugen

Software	SimMechanics Explorer	3dsMax	MSC Adams
Eigenschaft			
Beschreibung	Simulink basiert	Physics Engine basiert Animationssoftware	Mehrkörper-Simulationssoftware
Art der Simulation	kinematisch	geometrisch für die Arbeitsmaschine, dynamisch für die Leitung	Geometrisch für die Arbeitsmaschine, dynamisch für die Leitung
Simulationsdauer für 70 m Leitung	5 min	10 min	2 Tagen
Simulationsgenauigkeit (Skalar 1 bis 3: 3 ist sehr genau)	1	2	3

5.7 Projektierung und Beschaffung einer Li-Ionen Batterie zur Aufnahme am Kraftheber eines Traktors

In Zusammenarbeit mit John Deere wurde eine Li-Ionen Batterie zur Aufnahme am Kraftheber eines Traktors spezifiziert und über die TU Kaiserslautern zur Beschaffung ausgeschrieben. Auf die Ausschreibung erfolgte ein Angebot durch die Firma Kolibri Powersystems AG, das im Preis deutlich über dem Budget der TU lag. Weitere Angebote wurden nicht gemacht. Aufgrund der Unwirtschaftlichkeit des erhaltenen Angebots wurde kein Auftrag erteilt, sondern direkte Verhandlungen mit Kolibri unter Einbeziehung von John Deere aufgenommen. Im Zuge der Verhandlungen konnte eine technisch und wirtschaftlich tragbare Einigung erzielt werden, so dass Anfang September 2014 der Auftrag zum Bau der Batterie an Kolibri erteilt werden konnte.

Nach mehrfacher Verschiebung des Liefertermins, zwischenzeitiger Insolvenz und Umfirmierung der Kolibri Powersystems AG zur Colibri Energy GmbH wurde die Batterie mit Mängeln und nicht betriebsfähig am 09. Juni 2015 an die TU Kaiserslautern geliefert und nach Abstimmung des weiteren Vorgehens zu Colibri auf eigene Kosten zurückgesendet.

Nach länger andauernden Nachbesserungen an der Batterie, wurde Colibri durch die TU Kaiserslautern zur Beseitigung aller Mängel und Wiederauslieferung mit Fristsetzung zum 12. Februar 2016 ermahnt. Die erneute Anlieferung erfolgte am 18. Februar 2016 an der TU.

Im Zeitraum vom 1. Bis zum 14. April wurden die noch ausstehenden Abnahmetests durch den Projektpartner John Deere durchgeführt. Bei den Tests konnte eine Kommunikationsverbindung zu einem emulierten John Deere Traktor hergestellt werden und die Betriebsbereitschaft der Batterie am Prüfstand hergestellt werden. In einem Ladezyklus wurde gezeigt, dass Energie in der Batterie gespeichert und dieser anschließend wieder entnommen werden kann. Bei den Lade- und Entladeversuchen erwärmte sich die Batterie in einem für Li-Ionen Batterien üblichem Maße [7].

6 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses und Erfahrungen

Mit dem Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungssystem wurde ein Konzept für ein kompaktes Energieübertragungssystem entworfen. Dies ist für mobile Arbeitsmaschinen, bei denen Zuladung und Bau- raum begrenzt sind einsetzbar. Denkbar sind hier beispielsweise Bergbaumaschinen, die mit dem Stand heutiger Technik mit Drehstrom-Schleppleitungen elektrifiziert werden, dies jedoch mit geringen Leistungsichten und mittleren Leitungslängen. Bei entsprechend zur Verfügung stehenden Platz können sehr große Leistungen übertragen werden. Somit ist das neu entwickelte System auf einer großen Band- breite von Maschinen einsetzbar. Bei Maschinen mit verhältnismäßig kleinen Aktionsradius und ausrei- chend Platz für Schleppleitungen für konventionelle Drehstromantriebe ist es voraussichtlich wirtschaft- licher als das beschriebene HVDC-System.

Vergleichbare DC/DC-Wandler-Konzepte werden für die Anbindung von Offshore Windparks diskutiert, beispielsweise in [8].

7 Ergebnisse Dritter

Im Rahmen der Literaturrecherche zu Stromrichtern für Hochspannungsanwendungen wurde ein Patent aus dem Jahr 2002 gefunden, das einen modularen DC/DC-Wandler beschreibt [5]. Dieser Wandler ist in seiner grundsätzlichen Bauart dem in diesem Projekt entwickelten Wandler sehr ähnlich. Der Patentschutz besteht zum jetzigen Zeitpunkt nicht mehr.

Auf der Internationalen Industrieelektronik Konferenz *IECON 2015* der *IEEE* im November 2015 in Yokohama / Japan wurde ein ähnliches Konzept vorgestellt [8]. Zur Anbindung von Offshore Windparks an eine Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitung (HGÜ) werden modulare DC/DC-Wandler eingesetzt, bei denen die Hochspannung der HGÜ auf mehrere Wandlerausgänge aufgeteilt wird.

8 Veröffentlichungen

Tabelle 8.1: Veröffentlichungen zum Projekt

Art der Veröffentlichung	Veranstaltung	Ort	Datum	Vortragender
Konferenzbeitrag	IEEE – Industrial Electronics Conference (IECON) 2015	Yokohama / Japan	9.11. – 12.11.15	Jochen Barthel
Konferenzbeitrag	VDI Land.Technik Tagung	Köln	22.11.16-23.11.16	Marc Favier Steffen Feick

9 Literaturverzeichnis

- [1] Siemens&Kalske, „elektrischer Pflug“. Deutschland Patent 12,869, 1880.
- [2] N. Klokov, „Vorrichtung zur Schonung der Leitung von Elektrotraktoren“. Sowjetunion Patent SU407571, 1949.
- [3] J. Paraszcak, E. Svedlund, K. Fytas and M. Laflamme, "Electrification of Loaders and Trucks -- A Step Towards More Sustainable Underground Mining," *Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)*, no. 12, 2014.
- [4] H. Yamamoto, K. Fujita und H. Murata, „Product and Market Development of Large Electrically Driven Hydraulic Excavators Enjoying Strong Demand in Emerging Economies,“ *Hitachi Review*, Bd. 58, Nr. 6, pp. 251 - 256, 2009.
- [5] „ABB delivers complete electrical equipment for largest bucket wheel excavator in China,“ ABB, Februar 2011. [Online]. Available: <http://www.abb.de/cawp/seitp202/61d955dedef26a63c125784d0032031d.aspx>.
- [6] H. Reinold, „High-Voltage DC/DC Converter“. USA Patent 6,411,527 B1, 202.
- [7] V. Kegel, *Mündliche Information*, 2016.
- [8] K. Modepalli und L. Parsa, „Offshore wind energy systems using high frequency isolated current-fed modular converters,“ in *Industrial Electronics Society, IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE*, Yokohama, 2015.
- [9] J. Watson, „Story: Farm mechanisation,“ 2008. [Online]. Available: <http://www.teara.govt.nz/en/photograph/18408/electric-tractor>. [Zugriff am 09 2016].
- [10] rivershkipper, „Statt Liter - Kilowattstunden,“ Juli 2014. [Online]. Available: <http://rivershkipper.livejournal.com/100736.html>.
- [11] W. Manders, „Crop Enhancer Side Dressing Corn,“ 03 2013. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=JnCSBnAdrKQ>. [Zugriff am 09 2016].
- [12] Russisches Staatsarchiv für Film und Foto, „Elektrotraktor iauf einem Baumwollfeld,“ 1947. [Online]. Available: <http://rgakfd.altsoft.spb.ru/showObject.do?object=1804833559>. [Zugriff am 09 2016].

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN ISBN: 978-1-4799-1762-4	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Konferenzbeitrag
3. Titel High-voltage DC trailing cable systems for mobile machinery	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Barthel, Jochen Jung, Kilian Seewig, Jörg	5. Abschlussdatum des Vorhabens April 2016
	6. Veröffentlichungsdatum November 2015
	7. Form der Publikation Konferenzband
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität Kaiserslautern Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik Gottlieb-Daimler-Straße Gebäude 44 67663 Kaiserslautern	9. Ber. Nr. Durchführende Institution 10.1109/IECON.2015.7392254
	10. Förderkennzeichen 01ME12123
	11. Seitenzahl 7
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 22
	14. Tabellen 2
	15. Abbildungen 10
16. Zusätzliche Angaben n/n	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Industrial Electronics Society, IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Yokohama / Japan November 2015	
18. Kurzfassung <p>Über eine mitgeführte elektrische Anschlussleitung können mobile Arbeitsmaschinen kontinuierlich mit elektrischer Energie versorgt werden, ohne dass Batterien nachgeladen werden müssen. Dies ersetzt das Tanken entsprechender Maschinen mit Verbrennungsmotor.</p> <p>Im ersten Teil dieser Veröffentlichung wird auf der Basis einer Literatur-Recherche ein Überblick über den Stand der Technik leitungsgebundener mobiler Arbeitsmaschinen gegeben und eine alternative Leistungsübertragung in Gestalt einer Hochvolt-Gleichstrom-Übertragung vorgestellt.</p> <p>Im zweiten Teil wird ein Überblick über Gleichstrom-Wandler-Technologien gegeben und eine geeignete Lösung für mobile Arbeitsmaschinen vorgestellt. Diese besteht in einem modularen Wandler-Konzept, welches eine kompakte Bauweise mit einer Begrenzung der Spannung, die an den Halbleiterbauteilen anliegt, verbindet.</p>	
19. Schlagwörter DC-DC power converters; HVDC power transmission; machinery; power cables; high-voltage DC trailing cable systems; Conductors; Containers; Cranes; Joining processes; Mobile communication; Power supplies; Agricultural machinery; DC-DC power converters; Mining industry; Power transmission; Traction power supplies; Umbilical cable; agriculture	
20. Verlag IEEE	21. Preis 33 USD

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN ISBN: 978-1-4799-1762-4	2. type of document (e.g. report, publication) Conference presentation
3. title High-voltage DC trailing cable systems for mobile machinery	
4. author(s) (family name, first name(s)) Barthel, Jochen Jung, Kilian Seewig, Jörg	5. end of project April, 2016 6. publication date November 2015 7. form of publication Proceedings
8. performing organization(s) (name, address) University of Kaiserslautern Institute for Measurement and Sensor-Technology Gottlieb-Daimler-Straße Gebäude 44 67663 Kaiserslautern	9. originator's report no. 10.1109/IECON.2015.7392254 10. reference no. 01ME12123 11. no. of pages 7
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 22 14. no. of tables 2 15. no. of figures 10
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) Industrial Electronics Society, IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Yokohama / Japan November 2015	
18. abstract With trailing cable systems electric energy can be supplied continuously to mobile machinery, without the need of refueling or recharging batteries. In the first part of this paper a literature survey on state-of-the-art trailing tethered machinery is given and an alternative electric architecture based on high-voltage DC transmission is introduced. In the second part, an overview of DC-DC converter technology is given and a suitable concept for the problem at hand is proposed. To reduce the voltage across the semiconductors, a modular converter concept is presented, to realize compact converters for implementation on machines.	
19. keywords DC-DC power convertors; HVDC power transmission; machinery; power cables; high-voltage DC trailing cable systems; Conductors; Containers; Cranes; Joining processes; Mobile communication; Power supplies; Agricultural machinery; DC-DC power converters; Mining industry; Power transmission; Traction power supplies; Umbilical cable; agriculture	
20. publisher IEEE	21. price 33 USD

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Abschlussbericht zum Verbundvorhaben SESAM – Teilvorhaben: Umsetzung eines vollelektrischen Traktors – kabelgeführt und batteriebetrieben	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Barthel, Jochen Favier, Marc-Alexandre Feick, Steffen	5. Abschlussdatum des Vorhabens April 2016
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation Abschlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität Kaiserslautern Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik Gottlieb-Daimler-Straße Gebäude 44 67663 Kaiserslautern	9. Ber. Nr. Durchführende Institution n/n
	10. Förderkennzeichen 01ME12123
	11. Seitenzahl 30
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 12
	14. Tabellen 6
	15. Abbildungen 32
16. Zusätzliche Angaben n/n	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger im DLR, Köln, Oktober 2016	
18. Kurzfassung Im Projekt Sesam werden Konzepte für vollelektrische landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen entwickelt. Ziel ist die Nutzung stationär produzierter, erneuerbarer elektrischer Energie auf mobilen Landmaschinen. SESAM verfolgt dabei zwei unterschiedliche Wege der Elektrifizierung. Ein Konzept basiert auf Maschinen, die durch ein elektrisches Kabel mit dem Stromnetz verbunden sind. Prototypisch umgesetzt und erprobt wird das andere Konzept eines durch Batterien vollelektrifizierten Traktors.	
19. Schlagwörter Elektrifizierung, Landmaschinentechnik, Nutzfahrzeugtechnik, Energietechnik, Leistungselektronik	
20. Verlag n/n	21. Preis n/n

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planed	2. type of document (e.g. report, publication) report
3. title Abschlussbericht zum Verbundvorhaben SESAM – Teilvorhaben: Umsetzung eines vollelektrischen Traktors – kabelgeführt und batteriebetrieben	
4. author(s) (family name, first name(s)) Barthel, Jochen Favier, Marc-Alexandre Feick, Steffen	5. end of project April, 2016
	6. publication date Planed
	7. form of publication Brochure
8. performing organization(s) (name, address) University of Kaiserslautern Institute for Measurement and Sensor-Technology Gottlieb-Daimler-Straße Gebäude 44 67663 Kaiserslautern	9. originator's report no. -/-
	10. reference no. 01ME12123
	11. no. of pages 30
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 12
	14. no. of tables 6
	15. no. of figures 32
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) Projektträger im DLR, Köln, October 2016	
18. abstract In order to use stationarily produced renewable electric energy on mobile agricultural machines, concepts are being developed under the SESAM project for fully electric agricultural machines. Two different electrification paths are being pursued. The first one is based on the concept of machines that are connected to the power grid by an electric cable. The second path involves the implementation and testing of a prototype tractor that is fully electrified using batteries.	
19. keywords Electrification, Agricultural Machinery, Mobile Machinery, Energy Systems, Power Electronics	
20. publisher -/-	21. price -/-

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN ISBN: 978-3-18-092273-7	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Konferenzbeitrag
3. Titel Modellierung und Simulation leitungsgebundener Landmaschinen	
64. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Auclair, C.; Favier, Marc; Feick, S.; Fischer T.; Hruszczak, M.; Michael, V.; Su, Y.	5. Abschlussdatum des Vorhabens April 2016
	6. Veröffentlichungsdatum November 2016
	7. Form der Publikation Konferenzband
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität Kaiserslautern Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik Gottlieb-Daimler-Straße Gebäude 44 67663 Kaiserslautern	9. Ber. Nr. Durchführende Institution 12TA001016/VDI
	10. Förderkennzeichen 01ME12123
	11. Seitenzahl 8
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 7
	14. Tabellen 0
	15. Abbildungen 10
16. Zusätzliche Angaben n/n	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) 74. Tagung Land.Technik Köln /Deutschland November 2016	
18. Kurzfassung Die Bedeutung von leitungsgebundenen Arbeitsmaschinen in der Landtechnik steigt in Verbindung mit verschiedenen Aufgaben der Leitungsverbindung stetig an. Als Aufgaben der Leitungsverbindung können die Flüssigkeitsübertragung, die Elektrifizierung oder der Datenaustausch landtechnischer Maschinen angeführt werden. Seit 2014 forscht ein Team der Technischen Universität Kaiserslautern innerhalb des durch das BMWI finanzierten Projektes „SESAM“ (Sustainable Energy Supply for Agricultural Machinery) an der Modellierung, Simulation und Animation eines leitungsschonenden und intelligenten Leitungsführungssystems für mobile, leitungsgebundene Arbeitsmaschinen. Im Rahmen des Tagungsvortrags wird zunächst eine Methodik zur Modellierung leitungsgebundener Landmaschinen vorgestellt. Anschließend wird das Potential der Modellierung und Simulierung hinsichtlich der Einsparung von Kosten und Zeit während der Entwicklungsphase aufgezeigt. In der Abschlussbetrachtung werden die Ergebnisse eines Simulationsmodells mit der Realität verglichen.	
19. Schlagwörter Leitungsgebundene Arbeitsmaschinen, Mehrkörper Simulation, Physics Engine, Co-Simulation, Rapid Control Prototyping.	
20. Verlag VDI Verlag GmbH	21. Preis Noch nicht veröffentlicht

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN ISBN: 978-3-18-092273-7	2. type of document (e.g. report, publication) Conference presentation
3. title Modeling and Simulation of Tethered Agricultural Machines	
4. author(s) (family name, first name(s)) Auclair, C.; Favier, Marc; Feick, S.; Fischer T.; Hruszczak, M.; Michael, V.; Su, Y.	5. end of project April, 2016
	6. publication date November 2016
	7. form of publication Proceedings
8. performing organization(s) (name, address) University of Kaiserslautern Institute for Measurement and Sensor-Technology Gottlieb-Daimler-Straße Gebäude 44 67663 Kaiserslautern	9. originator's report no. 12TA001016/VDI
	10. reference no. 01ME12123
	11. no. of pages 8
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 7
	14. no. of tables 0
	15. no. of figures 10
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) 74. Tagung Land.Technik Köln /Deutschland November 2016	
18. abstract Die Bedeutung von leitungsgebundenen Arbeitsmaschinen in der Landtechnik steigt in Verbindung mit verschiedenen Aufgaben der Leitungsverbindung stetig an. Als Aufgaben der Leitungsverbindung können die Flüssigkeitsübertragung, die Elektrifizierung oder der Datenaustausch landtechnischer Maschinen angeführt werden. Seit 2014 forscht ein Team der Technischen Universität Kaiserslautern innerhalb des durch das BMWI finanzierten Projektes „SESAM“ (Sustainable Energy Supply for Agricultural Machinery) an der Modellierung, Simulation und Animation eines leitungs-schonenden und intelligenten Leitungsführungssystems für mobile, leitungsgebundene Arbeitsmaschinen. Im Rahmen des Tagungsvortrags wird zunächst eine Methodik zur Modellierung leitungsgebundener Landmaschinen vorgestellt. Anschließend wird das Potential der Modellierung und Simulation hinsichtlich der Einsparung von Kosten und Zeit während der Entwicklungsphase aufgezeigt. In der Abschlussbetrachtung werden die Ergebnisse eines Simulationsmodells mit der Realität verglichen.	
19. keywords Leitungsgebundenen Arbeitsmaschinen, Mehrkörpersimulation, Physics Engine, Co-Simulation, Rapid Control Prototyping, Landtechnik	
20. publisher VDI Verlag GmbH	21. price Not published yet