HOCHSCHULE SCHMALKALDEN
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Tag der Forschung 2018

Nachwuchswissenschaftler
präsentieren aktuelle Forschungsergebnisse

HSM-Prints 2/2018
Schriftenreihe der
Hochschule Schmalkalden

Tagungsband der Hochschule Schmalkalden

Tag der Forschung 2018

Nachwuchswissenschaftler
präsentieren aktuelle Forschungsergebnisse

Schmalkalden 2018
HSM-Prints 2/2018

HSM-Prints
Die Schriftenreihe der Hochschule Schmalkalden
Herausgeber: Hochschule Schmalkalden,
Der Rektor
ISSN 0949-1767

Produktion: André Mock
Referat Öffentlichkeitsarbeit
Hochschule Schmalkalden
Blechhammer
98574 Schmalkalden
Tel.: +49 (0) 3683 / 688-1021
Fax: +49 (0) 3683 / 688-1999

Inhaltsverzeichnis Tagungsband Tag der Forschung

Referent:

Vorträge der Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler

Seite

Additive Fertigung von temperierten Großwerkzeugen mittels Lichtbogen und Diffusionsschweißtechnik
Johannes Ullrich, M. Eng. 5

Konzept eines vollständig elektrifizieren Antriebsstrangs für ein Fahrrad
Simon Rönnecke, M. Sc. 10

Positionsschätzung mit RTLS-Flares für mobile Roboter
Norbert Fränzel, M. Sc. 21

Modellierung des Reibschweißverfahrens
Tobias Schneider, M. Eng. 25

Methodik zur Schneidprozessanalyse am Beispiel eines selbstfahrenden Feldhäckslers
Luise Merbach, M. Eng. 32

Posterausstellung

Lignin-based binder for high performance carbon electrode
Nur Batrisyia binti Tajuddin[1], Annett Dorner-Reisel[1], Viola Matner[1], Stefan Svoboda[1], Horst Schäfer[1]

Bioplastics goes automotive! Biogen filaments for 3D printing of automotive parts

Ertan G. Ertane[1], Annett Dorner-Reisel[1], Thomas Welzel[2], Özlem Baran[3], Viola Matner[1], Stefan Svoboda[1]

Mechano-chemical activation of biochar using N-doping

Nik Muhd. Azuan b. Nik Salleh[1], Annett Dorner-Reisel[1], Viola Matner[1], Stefan Svoboda[1], Horst Schäfer[1]

Biomimetic sol-gel-coatings: Structuring by femtosecond Laser

Annett Dorner-Reisel[1], Steffen Weißmantel[4], Manuel Pfeiffer[4], Viola Matner[1], Xin Wang[5], Stefan Svoboda[1]

Bike-by-Wire - Konzept eines vollständig elektrifizierten Antriebsstrangs für ein Fahrrad

Simon Rönnecke[1], Christoph Menz[1], Silvio Bachmann[1]

Induktive drahtlose Energieübertragung für Sensorknoten

Martin Reum[1], Thomas Höhn[1], Benjamin Reiss[1], Carsten Roppel[1]

Konzentrationsabhängige Patch - Clamp - Messungen unter Berücksichtigung von Diffusionsprozessen

E. Schulz[1], R. Schmauder[6], T. Eick[6], S. Hummert[6], K. Benndorf[6]

Indoor Positioning Systems (IPS): Ein multidimensionales Framework

Michael Cebulla[1]

[1]Hochschule Schmalkalden

[2]Thüringisches Institut für Textil und Kunststoff-Forschung e.V., Rudolstadt

[3]Erzincan University, Türkei

[4]Hochschule Mittweida

[5]Saimaa University of Applied Sciences, Lappeenranta, Finnland

[6]Universitätsklinikum Jena, Institut für Physiologie II

Additive Fertigung von temperierten Großwerkzeugen mittels Lichtbogen- und Diffusionsschweißtechnik

Referent:

Johannes Ullrich, M.Eng.[1], Prof. Dr.-Ing. Thomas Seul[1], Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann[2], Dr.-Ing. Jörg Hildebrand[2], Yarop Ali, M.Eng.[2], Dr.-Ing. Simon Jahn[3] Dr.-Ing. Steffen Dahms[3], Daniel Eilenberger, M.Eng.[3]

[1]Hochschule Schmalkalden, Germany
[2]TU Ilmenau, Germany
[3]Günther-Köhler-Institut ifw Jena, Germany

1 Einleitung

Die Temperierung von Formwerkzeugen, hier insbesondere für den Bereich Spritzgießen, hat einen maßgeblichen Einfluss auf die gefertigten Bauteile und den Gesamtprozess. Schwindung, Verzug, Kristallinitätsgrad, Zykluszeit, etc. können maßgeblich durch das jeweilige Temperierkonzept beeinflusst werden, wobei die Qualität der Kunststoffartikel immer in den Vordergrund gestellt werden sollte [1].
Gerade bei Technologien wie Variothermer Prozessführung [2] spielt die Lage und Anzahl der Kühlkanäle eine entscheidende Rolle. Im kleinen und mittleren Werkzeugbereich können diese über Verfahren wie Selektives Lasersintern [3,4] oder Lötprozesse [5] konturnah generiert werden.
Die derzeit erhältlichen additiven Fertigungsverfahren sind allerdings kostenintensiv und in ihrem Bauraum begrenzt. Beispielsweise stellen die momentan verfügbaren Lasersinteranlagen einen maximalen Bauraum von ca. 400x400x400mm³ zur Verfügung. Daher ist der Einsatz derartiger Technologi-en auf bestimmte Spritzgießwerkzeuggrößen beschränkt.
Bei größeren Anwendungen müssen nach wie vor konventionelle Verfahren, wie beispielsweise Tieflochbohren, zum Einsatz kommen. Allerdings kann hier nicht immer eine optimale Lage der Kanäle gewährleistet werden [6].
Daher erarbeitet die Forschergruppe TemGro (Temperierung von Großwerkzeugen) bestehend aus dem Labor für Angewandte Kunststofftechnik der Hochschule Schmalkalden, dem Fachgebiet Fertigungstechnik der TU Ilmenau und dem ifw Jena Grundlagenerkenntnisse zum generativen Aufbau großfor-matiger Werkzeuge mit integrierten Temperierkanälen, wobei nicht nur der kavitätsnahe Bereich, sondern das gesamte Werkzeug in den Fokus gestellt wird. Dabei stehen die beiden Verfahren additives Lichtbogenschweißen und Diffusionsschweißen als Technologien zur Verfügung.

2 Additive Fertigungsverfahren

2.1 Additives Lichtbogenschweißen

Das Lichtbogenschweißen ist ein etabliertes und vorrangig manuelles Verfahren das täglich in verschiedenen Unternehmen Anwendung findet.

Durch den Ersatz der menschlichen Hand durch einen Roboter wird daraus ein additives Fertigungsverfahren [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Durch entsprechende Programmierung, Schweißfolgepläne und CAD-Modelle können somit 3D-Strukturen generativ gefertigt werden. Der Bauraum ist hierbei lediglich auf den möglichen Verfahrweg des Roboters oder des Handhabungssystems beschränkt.

Frühere Versuche zeigten, dass es möglich ist, Stahl-Massivkörper, wie das auf Abbildung 1 dargestellt Schaufelrad, die anschließend z.B. durch Fräsen nachbearbeitet werden, mit dem Vorteil der Freiheitsgrade der additiven Fertigung zu produzieren.

Abb. 1: Mittels energiereduzierter Kurzlichtbogentechnik additiv hergestelltes Schaufelrad

Für den Einsatz im Werkzeug- und Formenbau müssen allerdings noch die entsprechenden Stähle schweißtechnisch erprobt, sowie Gefüge- und Härteuntersuchungen durchgeführt werden. Auch die Abbildegenauigkeit hinsichtlich Lage und Geometrie der Temperierkanäle, die mit dem Lichtbogen realisiert werden können, muss untersucht werden. Ziel ist die Erzeugung einer homogenen Struktur und eines Werkstücks ohne Unregelmäßigkeiten.

2.2 Diffusionsschweißen im Bereich Werkzeugbau

Diffusionsschweißen ist ein Pressschweißverfahren [16] zur Verbindung zwei oder mehrerer einzelnen Platten zu einem Bauteil, dass sich anschließend wie Vollmaterial verhält. In speziellen Anlagen werden unter Hochvakuum oder Schutzgasatmosphäre bei erhöhten Temperaturen und gleichzeitiger Kraftaufbringung Metalle, z.B. Stahlwerkstoffe oder Titan, oder auch Keramiken aneinander gepresst, wobei zwischen den Fügepartnern eine fugenlose Verbindung ohne Zusatzwerkstoff erzeugt wird, u.a. aufgrund von Kornwachstum[17, 18, 19, 20]. Auf Abbildung 2 sind im linken Teil Einzelplatten eines zu fügenden Bauteils ersichtlich und im rechtem Abschnitt ein Aufbau zum Fügen dieser Werkstück in der diffusionsschweißanlage.

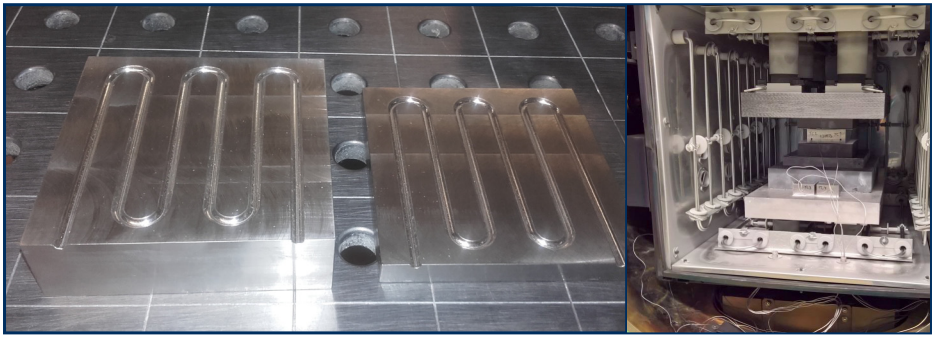


Abb. 2: Einzelteile vor dem Diffusionsschweißen (links), sowie Aufbau zum Fügen in der Anlage (rechts)

Die Herausforderung im Projekt besteht im Einsatz von Werkzeugbaustählen und der Skalierung des Verfahrens hin zu größeren Bauteilabmessungen jenseits der bisherigen Standartgrößen von 300x300x300mm³ [21]. Entsprechend ausgelegte Anlagentechnik ist dafür verfügbar.

3 Projektziele

Ein Ziel ist die robuste und reproduzierbare Herstellung von Kühlkanälen mit geringen Abweichungen bzw. Toleranzen in der örtlichen Position und in der Querschnittsgeometrie in großen Strukturen, die nach der Produktion eine geringen Eigenspannungs- und Verzugszustand aufweisen. Weitere Teilziele sind die Ermittlung der Einsatzgrenzen bei der Kombination der zwei additiven Fertigungsverfahren, sowie die Festlegung von geeigneten geometrischen Schnittstellen und Toleranzen, um die Prozessmöglichkeit in der Prozesskette zu realisieren. Die neuartigen Werkzeugtypen werden im Vorhaben, insbeson-dere an den Beispielen Spritzgießen und Blechumformung validiert.
Eine Gegenüberstellung von konventionell gefertigten Werkzeugen, mit einem additiven Verfahren, sowie durch hybride Fertigung in Kombination von Lichtbogen- und Diffusionsschweißen hergestellten Werkzeugen, soll letztendlich die Potentiale aufzeigen, welche sich durch das neue Verfahren im Hinblick auf Effizienz der Herstellung und Qualität der erzeugten Bauteile ergeben.

4 Aktuelle Arbeiten

Aktuell sind verschiedene Funktionsmuster entwickelt und mittels Simulationssoftware thermisch und prozesstechnisch ausgelegt. Abbildung 3 zeigt hier beispielhaft auf der linken Seite das CAD-Modell, in der Mitte das daraus lichtbogengeschweißte Funktionsmuster mit offenen Temperierkanälen und rechts mit verschlossenen Kanälen. Dieses Bauteil muss anschließend noch durch spannende Verfahren endbearbeitet werden.

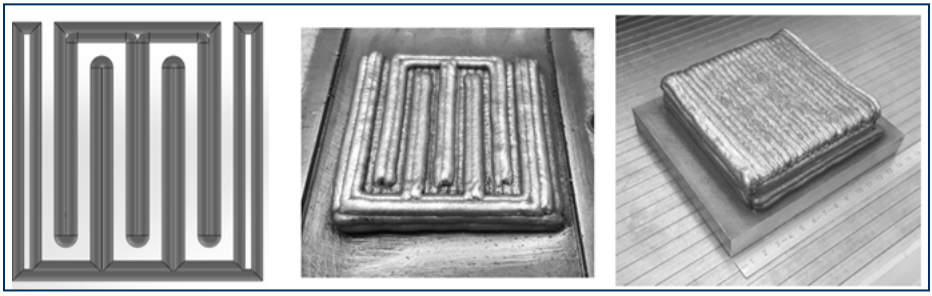


Abb. 3: mittels Lichtbogenschweißen additiv gefertigte Funktionsmuster

Die Funktionsmuster wurden mit den beiden Fertigungsverfahren aus verschiedenen Werkzeugbaustählen hergestellt und thermografisch untersucht.
Somit konnte im Labormaßstab bereits die grundsätzliche Machbarkeit nachgewiesen werden. Im weiterem Vorgehen finden weitergehende Simulationen und Untersuchungen statt, um die Erkenntnisse grundlegend zu vertiefen. Zudem müssen die Verfahren um auf die entsprechenden Bauteilgrößen zu gelangen hochskaliert werden.

Literatur

[1] Michaeli, W.: Einführung in die Kunststoffverarbeitung, 6. Auflage, Carl Hanser Verlag,München, 2011

[2] Qingfeng, A; Bleesen, C.; Burr, A.; Wagner, M. H.; Gleiter, U.: Zyklusverkürzung beim RTM-Prozess, Kunststoffe, 12(2015), S. 50-54

[3] N.N.: http://www.greencarbody.de/cgi-bin/click.system?navid=Verbundprojekte_ InnoCaT_3_322_ Blech-warmumformen_1222, abge-rufen am 20.01.2016

[4] N.N.: https://www.era-learn.eu/network-information/networks/manunet-ii/manu net-call-2013 /high-performance-sheet-metal-forming-tooling, abgerufen am 20.01.2016

[5] N.N.: http://www.contura-mtc.de, abgerufen am 10.02.2016

[6] Menges, G.; Michaeli, W.; Mohren, P.: Spritzgießwerkzeuge – Auslegung, Bau, Anwendung, 6. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2007

[7] Baufeld, B.; van der Biest, O.: Mechanical properties of Ti-6Al-4V specimens produced by shapedmeta deposition, Science and Technol-ogy of Advanced materials, 10(2009), 10 pp

[8] Baufeld, B.; van der Biest, O.; Gault, R.: Additive manufacturing of Ti–6Al–4V components by shaped metal deposition, Materials and Design, 31(2010), pp. 106-111

[9] Baufeld, B.: Effect of deposition parameters on mechanical properties of shaped metal deposition parts, Journal of Engineering Manufacture, 226(2012)B1, pp. 126-136

[10] Baufeld, B.: Mechanical properties of Inconel 718 parts manufactured by shaped metal deposition (SMD), Journal of Materials Engineering and Performance, 12(2012)7, pp 1416-1421

[11] Bonaccorso, F.; Cantelli, L.; Muscato, G.: Arc welding control for a shaped metal deposition plant, 18th IFAC World Congress, Milano, 2011

[12] Brandl, E.; Baufeld, B.; Leyens C.; Gault R.: Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: comparison of laser and arc beam deposi-tion and evaluation with respect to aerospace material specifications, Physics Procedia 5(2010)B, pp. 595-606

[13] Martina, F.; Mehnen, J.; Williams, S. W.; Colegrove, P.; Wang F.: In-vestigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti–6Al–4V, Journal of Materials Processing Technol-ogy, 212(2012)6, pp. 1377-1386

[14] Informationen zum EU-Projekt “Rapolac”: http://www.2020-horizon.com/RA

Konzept eines vollständig elektrifizierten Antriebsstrangs für ein Fahrrad

Simon Rönnecke, Christoph Menz, Silvio Bachmann
Hochschule Schmalkalden, Fakultät Elektrotechnik

1 Zusammenfassung

Es wird ein Konzept vorgestellt, durch dessen Umsetzung sich ein Fahrrad ohne Energiespeicher und externe Energiequelle elektromotorisch antreiben lässt. Die vorgestellte Antriebsstruktur beinhaltet einen, mit den Pedalen mechanisch gekoppelten, Generator und mindestens einen sensorlos, feldorientiert geregelten, permanenterregten Synchronmotor in der Radnabe. Das übergeordnete eingebettete Energiemanagement ermöglicht die direkte Übertragung der aufgebrachten Muskelkraft an die Räder und eine gezielte Beeinflussung des Fahrverhaltens zur deutlichen Steigerung von Komfort und Sicherheit beim Fahrradfahren.

2 Einleitung

Die Kraftfahrzeugindustrie - insbesondere die Automobilindustrie - zielt in ihrer technischen Entwicklungsstrategie auf das autonome Fahren ab. Hintergrund dieser Strategie ist neben der Steigerung des Komforts, die relevante Erhöhung der Verkehrssicherheit und damit vor allem die Vermeidung von Unfällen mit Personenschäden im Straßenverkehr.

Technische Ansätze zur Erreichung dieses Ziels für das System Automobil sind

- der Einsatz intelligent agierender, elektronischer Assistenzsysteme mit gerätespezifischen Aufgabenstellungen,
- die Ausprägung einer dezentral organisierten Netzwerkstruktur aus den einzelnen Assistenzsystemen sowie
- die Bestimmung der Funktionalität und Handlungsstrategie des Fahrzeuges durch das Netzwerk der Komponenten.

Das vernetzte Automobil bildet dann im weiteren, mittels Car2X Kommunikation, sowohl mit anderen Automobilen (C2C - Car to Car) als auch der Umwelt, insbesondere der Verkehrsinfrastruktur (C2I - Car to Infrastructure), ein gemeinsam agierendes System. [1] Konstruktiver Ansatz für die Gestaltung einzelner Assistenzsysteme ist X-by-Wire. Ausgehend vom regelungstechnischen Grundprinzip werden die Komponenten eines Assistenzsystems wie Sensoren, Verarbei-

tungseinheit und Aktoren als selbstagierende Baugruppen gestaltet, welche zur Kommunikation und Energieversorgung über Leitungen miteinander verbunden sind. Dadurch können mechanische Verbindungen zwischen Bedienelementen und Aktoren durch die leitungsgebundene Übertragung von Steuersignalen ersetzt werden. [2]

Das System Fahrrad ist in diese Entwicklungsstrategie bisher nicht bzw. nur rudimentär als passiver Verkehrsteilnehmer ähnlich dem Fußgänger eingebunden.

Ziel des vorgestellten Konzeptes ist, in Anlehnung an die Strategie der Automobilindustrie, die Entwicklung eines vollständig elektrifizierten Antriebsstrangs für das Fahrrad (Bike-by-Wire). Damit wird die Voraussetzung für aktive Assistenzsysteme und eine dezentral vernetzte Funktionsstruktur zur Realisierung eines intelligenten sicheren Fahrrades geschaffen. Als aktiv agierender Verkehrsteilnehmer trägt es zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und damit aller beteiligten Verkehrsteilnehmer bei.
Durch die *„Elektronifizierung“* des Fahrrades kann elektrische Energie für alle aktiven Systeme bereitgestellt werden, wobei das geplante System im Gegensatz zu E-Bikes bzw. Pedelecs ohne externen Energiespeicher (Akku) auskommt und damit eine durchgängige Verfügbarkeit der elektronischen Komponenten aufweist.

3 Stand der Technik

Der konventionelle, mechanische Fahrradantrieb (Tabelle 3.1) bestehend aus Kettenblatt, Kette und Ritzel, kommt seit über 100 Jahren zum Einsatz und wurde seitdem durch verschiedene mechanische Schaltwerke (wie Kettenschaltung, Nabenschaltung oder Tretlagerschaltung) ergänzt, die sich über Bowdenzüge oder auch elektrisch betätigen lassen. Einige neuere Fahrradmodelle ersetzen die Kette durch einen pflegeleichteren Zahnriemen, der jedoch besondere Anforderungen an das Schaltwerk stellt. Ein deutlicher Trend im Fahrradsegment geht zum elektrisch unterstützten Fahren. [3] E-Bikes ergänzen den mechanischen Antriebsstrang durch einen, aus einem Akku gespeisten Elektromotor, der den Fahrer, sobald er die Pedale bewegt, mit in Stufen einstellbarer Leistung unterstützt.

In Tabelle 3.1 sind die gängigsten Bauformen dargestellt, wobei sich, auf Grund des tiefliegenden Schwerpunktes, ein Trend zum Mittelmotor abzeichnet. In den Konzeptdarstellungen nicht berücksichtigt sind die Varianten der Positionierung des Akkus, der ebenfalls wesentlich zur Gesamtmasse des Fahrrades beiträgt.

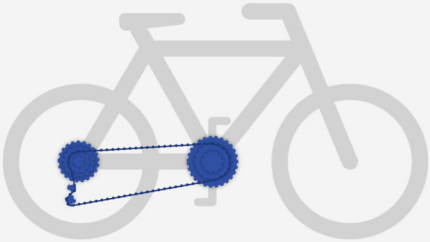
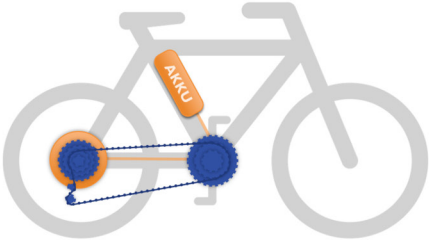
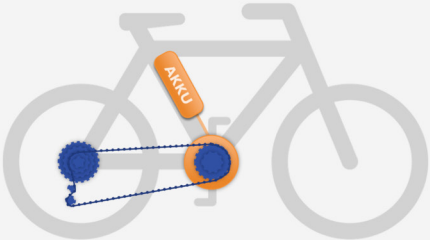
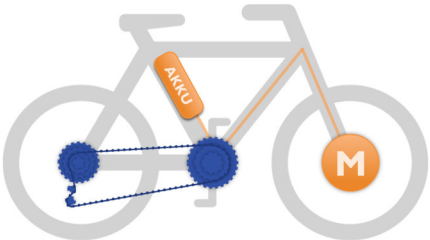
Antriebsart		Konzeptdarstellung des Anriebsstrangs
mechanisch		
mit elektrischer Unterstützung (E-Bikes)	Nabenmotor als Hinterradantrieb	
	Mittelmotor als Hinterradantrieb	
	Nabenmotor als Vorderradantrieb	

Tabelle 3.1: Vergleich der gängigsten Antriebskonzepte für Fahrräder sowie elektrisch unterstützte E-Bikes anhand von Konzeptdarstellungen der mechanischen (blau) und elektrischen Komponenten (orange) des Antriebsstrangs

4 Systemdesign

Der vorgestellte, elektrifizierte Antriebsstrang (Abbildung 4.1) verzichtet vollständig auf die mechanischen Komponenten des konventionellen Fahrradantriebs, sowohl bei der Kraftübertragung zum Rad, als auch bei der Schaltung, die durch eine adaptive, elektrische Drehmomentenregelung ersetzt wird. Für eine elektrische Unterstützung wird lediglich ein zusätzlicher Akku benötigt.
An Stelle von Kette und Gangschaltung treten ein - mit den Pedalen mechanisch gekoppelter - Generator, zur Umwandlung mechanischer Arbeit in elektrische Energie und mindestens ein Motor in der Radnabe, der das Fahrrad mit der zur Verfügung stehenden Energie antreibt. Die eingebettete Steuereinheit (Bike Control Unit - BCU) dient der Motoransteuerung und ermöglicht durch ein übergeordnetes Energiemanagement die direkte Übertragung der aufgebrachten Muskelkraft an die Räder, sowie eine gezielte Beeinflussung des Fahrverhaltens.

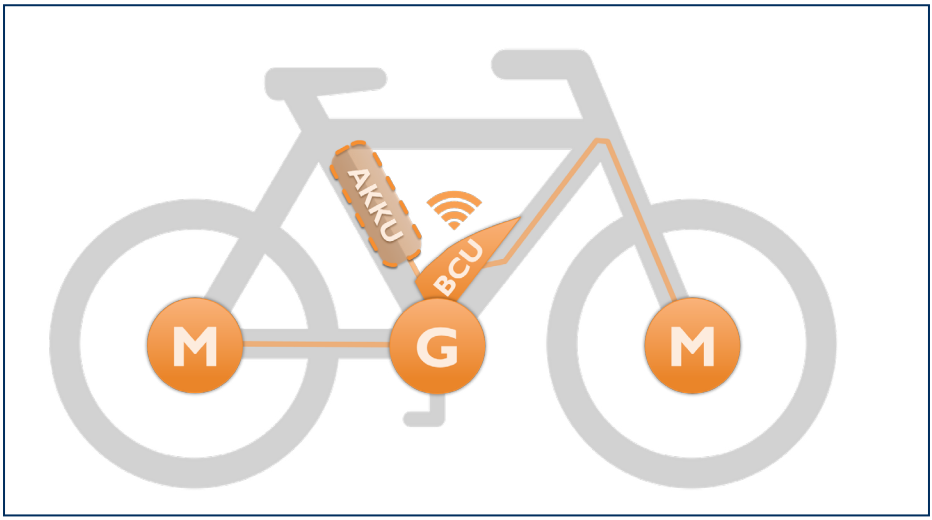


Abbildung 4.1: vollständig elektrifizierter Antriebsstrang (rechts) bestehend aus einem Generator (G), einer eingebetteten Steuereinheit (Bike Control Unit - Bden Radnaben (M) und optionalem Energiespeicher (Akku)

Besondere Herausforderung bei der Umsetzung dieses Konzeptes ist es, dem Nutzer durch ergonomische, pedalwinkelabhängige Regelung der Pedalkraft ein gewohntes Fahrgefühl zu vermitteln. Durch individuelle Adaption des Generatordrehmomentes lässt sich darüber hinaus eine stufenlose, automatische Gangschaltung simulieren, die das Antriebsmoment an die entsprechenden Lastverhältnisse (insbesondere Steigung) anpasst und unabhängig von den Streckengegebenheiten eine individuelle Trittfrequenz ermöglicht.

Der Fahrradantrieb nach dem Konstruktionsprinzip X-by-Wire erhöht die Freiheitsgrade beim Rahmendesign und ermöglicht eine praktikable Realisierung eines Allradantriebes. Ein zusätzlicher Speicher ermöglicht die Nutzung von, durch Rekuperation zurückgewonnener Bremsenergie und eine zusätzliche Unterstützung des Fahrers und erweitert damit die Anforderungen an das Energiemanagement. Das rein elektrische Antriebskonzept schafft die Basis, elektronische Assistenzsysteme, wie sie bereits im Automobilbereich etabliert sind, in das Fahrrad zu integrieren.

4.1 Hardwarekonzept

Wie in Abbildung 4.1 dargestellt sind die Hauptkomponenten des Antriebsstrangs drei elektrische Maschinen als Wandler zwischen mechanischer und elektrischer Energie im System. Die Steuereinheit (BCU) beinhaltet neben einem Mikrocontroller auch die notwendige Leistungselektronik für das Energiemanagement.

elektrische Maschinen

Besonders im Bereich der Elektromobilität hat sich die permanenterregte Synchronmaschine als wichtigster Antriebsmaschinentyp durchgesetzt. Die wesentlichen Vorteile sind die hohe Leistungsdichte, durch den Einsatz von Seltenerdenmagneten wie Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) und die hohe Lebensdauer durch Verzicht auf verschleißbehaftete Bauteile wie Kohlebürsten eines mechanischen Kommutators. Der Läufer der Maschine weist einzelne, durch Dauermagneten erzeugte, Pole auf, die synchron im, durch die Wicklung des Ständers erzeugten Magnetfeld, rotieren. Für den motorischen Betrieb ist daher die Erzeugung einer dreiphasigen Wechselspannung in Abhängigkeit des Läuferwinkels durch einen gesteuerten Umrichter notwendig. Das dazu eingesetzte Verfahren der feldorientierten Regelung benötigt den Drehwinkel des Motors, welcher sich auch sensorlos durch elektrische Messung der Gegen-EMK (elektromagnetische Gegenkraft) bestimmen lässt. [4]

Auf Grund der relativ niedrigen Drehzahlen beim Betrieb des Fahrrads sind die Motoren hochpolig ausgeführt und oft zusätzlich mit einem Getriebe versehen. Es sind jedoch auch Direktantriebe für E-Bikes erhältlich, mit denen sich zwar höhere Wirkungsgrade erreichen lassen, die aber höhere magnetische Flüsse im Eisenkreis führen müssen und daher größer und schwerer sind. Für den Einsatz in der Radnabe bieten sich Außenläufer mit feststehendem Kern an, dagegen werden als Mittelmotor Innenläufer eingesetzt.

Leistungselektronik

In Abbildung 4.3 ist der Antriebsstrang mit den zur Realisierung des Antriebskonzeptes notwendigen leistungselektronischen Komponenten dargestellt. Der Generator ist über einen ungesteuerten Brückengleichrichter (B6U) an einen Zwischenkreiskondensator angeschlossen. Aus diesem wird die Steuerungselektronik (BCU) über einen Tiefsetzsteller versorgt. Die Ansteuerung der Nabenmotoren erfolgt sensorlos, feldorientiert geregelt über gesteuerte MOSFET-Brückenschaltungen (B6C) und ermöglicht den Betrieb in vier Quadraten, was die generatorische Energierückspeisung einschließt. Durch Sollwertvorgabe können Drehmoment oder Drehzahl der Motoren über die Steuerungssoftware geregelt werden.

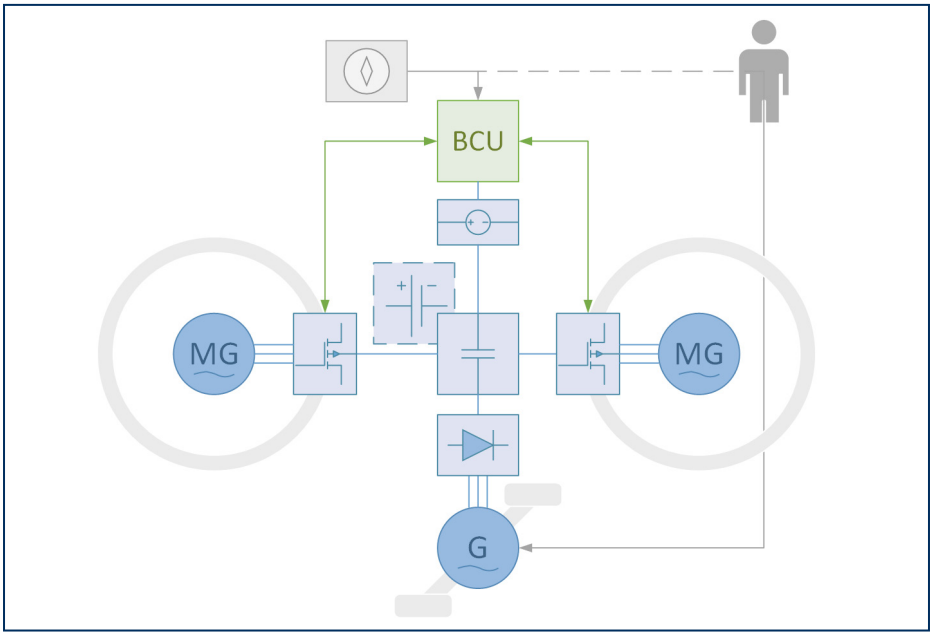


Abbildung 4.3: Systemkomponenten des vollständig elektrifizierten Antriebsstrangs, bestehend aus elektrischen Maschinen, Leistungselektronik und Energiemanagement

4.2 Softwarekonzept

Aus den Zielen Komfort und Sicherheit beim Fahrradfahren zu erhöhen und die Nutzerakzeptanz zu fördern leiten sich die Anforderungen an einen vollständig elektrifizierten Antriebstrang für ein Fahrrad ab. Es ergeben sich die folgenden Aufgabenstellungen:

- die optimale Nutzung der vom Nutzer bereitgestellten Energie bei zusätzlicher Minimierung des Energieverbrauches der elektronischen Komponenten,
- die Vermittlung eines gewohnten Fahrverhaltens durch ergonomische Pedalkraftregelung,
- die Simulation einer stufenlosen (automatischen) Gangschaltung durch individuelle Anpassung des Drehmoments an der Pedale und nicht zuletzt
- die Erfüllung von Anforderungen bzgl. der funktionalen Sicherheit.

sensorlose feldorientierte Regelung

Um die Synchronmotoren zu betreiben, werden in den drei Phasen sinusförmige Ströme eingespeist, so dass ein, der momentanen Drehzahl entsprechendes, Drehfeld entsteht. Die dafür benötigte Rotorposition wird indirekt aus den elektrischen Maschinengrößen ermittelt (Abbildung 4.5, Beobachter). Durch Sollwertvorgabe können so Drehmoment (I_q ref.) oder Drehzahl (ω ref.) der Motoren vorgegeben werden. Zur Regelung der Maschine werden die gemessenen elektrischen Größen von einem rotierenden Dreizeigersystem (I_{abc}) unter Verwendung des Rotorwinkels (Θ) in ein feststehendes rechtwinkliges Koordinatensystem überführt, in welchem sich die Synchronmaschine analog einer Gleichstrommaschine regeln lässt. Mittels Raumzeigermodulation (RZM) werden dann die Spannungen ermittelt, die als pulsweitenmoduliertes (PWM) Signal an die Motorphasen angelegt werden. [4]

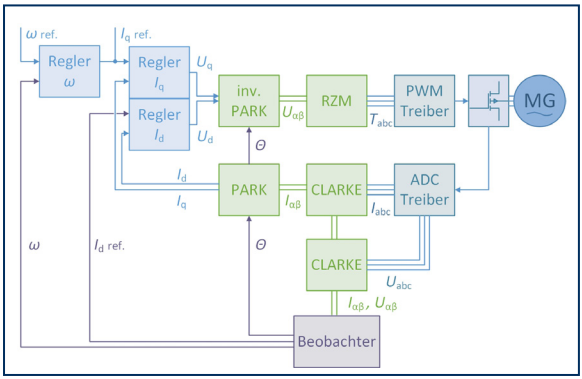


Abbildung 4.5 Softwarekonzept zur Realisierung sensorloser feldorientierter Regelung für die Motoransteuerung in Anlehnung an [5], Abbildung 1

Energiemanagement

Außerdem beinhaltet das Softwarekonzepts einen übergeordneten Regler für das Energiemanagement (Abbildung 4.7), der die Leistungsabgabe an die Motoren (M_A), in Abhängigkeit von der Zwischenkreisspannung U_{ZK}, so regelt, dass sich die Lastverhältnisse am Generator und damit ein entsprechendes Gegenmoment (M_G) nutzerindividuell, gelände- [6] und leistungsabhängig [7] einstellt.

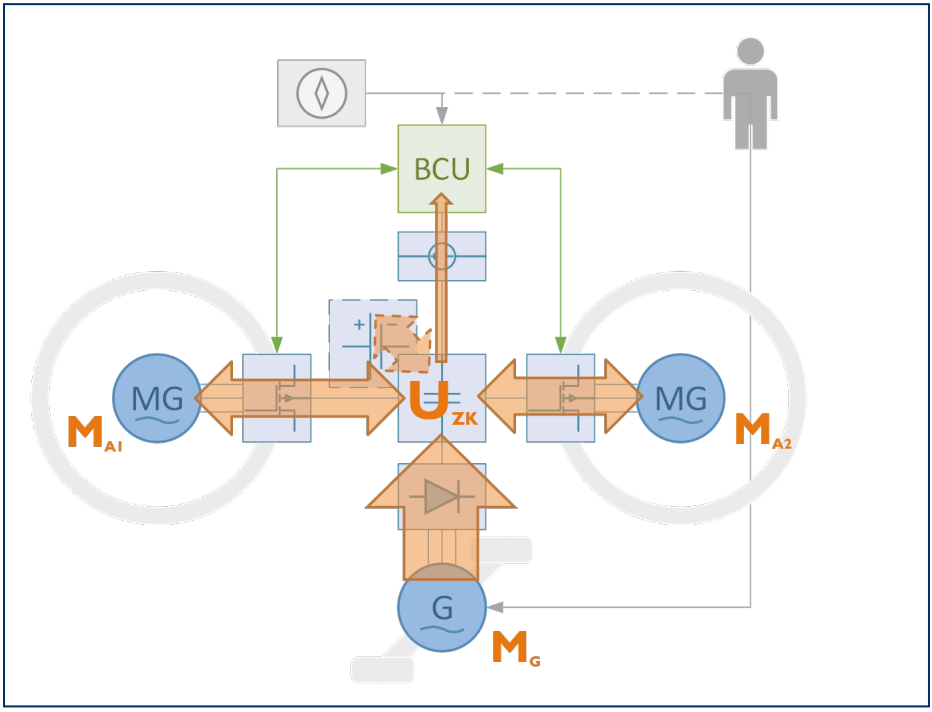


Abbildung 4.7: Systemkomponenten des vollständig elektrifizierten Antriebsstrangs mit in orange dargestelltem Energiefluss zwischen den Komponenten

Der Fahrer beeinflusst das Fahrverhalten nur durch die von ihm an den Pedalen eingebrachte mechanische Leistung, charakterisiert durch Drehzahl und Drehmoment (M_G). Zusätzlich können Sensorik am Fahrrad oder individuelle Benutzereingaben in die Regelung einbezogen werden. Bei Nutzung eines Akkus als Energiespeicher ermöglicht das Energiemanagement eine individuelle Unterstützung des Fahrers abhängig von der durch ihn aufgebrachten Leistung. Diese ist der manuell in stufen einstellbaren Unterstützung mit konstanter Leistung eines E-Bikes überlegen. Die regelbare Energierückspeisung ermöglicht ein stufenloses, elektronisches Bremssystem und Bremseingriffe durch Assistenzsysteme.

5 Implementierung als Labormuster

Basierend auf dem vorgestellten Konzept wurde, zum Nachweis der prinzipiellen Machbarkeit, ein Labormuster (Abbildung 5.1) entwickelt.

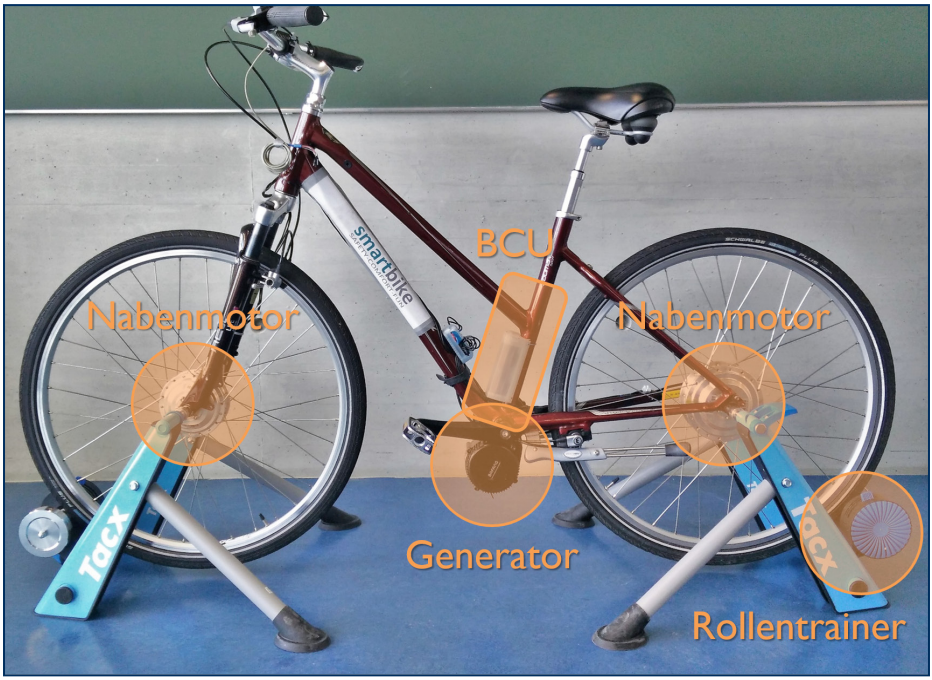


Abbildung 5.1: Labormuster auf dem Prüfstand (Komponenten zur Realisierung des Konzeptes sind markiert)

Hierfür wurde ein herkömmliches Fahrrad mit zwei Nabenmotoren und einem Tretlagermotor ausgestattet (Tabelle 5.1), die jeweils für den generatorischen Betrieb angepasst wurden. Die Komponenten stammen aus handelsüblichen E Bike Nachrüstsätzen.

Maschinendaten	Vorderrad	Hinterrad	Tretlager
Hersteller	Bafang	Bafang	Bafang
Typ	SWXK	BFSWX02	BBS01B
Leistung	250W	250W	250W
Nennspannung	36V	36V	36V
Bauform	permanenterregte Synchronmaschine mit integriertem Getriebe		

Tabelle 5.1: nachgerüstete Komponenten für das Antriebssystem des Labormusters

Sonstige, den Antrieb betreffende Bestandteile, wie Zahnkränze, Ketten und Schaltungskomponenten wurden entfernt. Als Prüfstand werden Rollentrainer an beiden Räder eingesetzt, deren Magnetbremssystem die Räder über eine Rolle am Reifen stufenweise einstellbar belastet. Als BCU fungiert ein Entwicklungsboard der Firma Texas Instruments mit einem darauf befindlichen Mikrocontroller (TMS320 F28069M) mit integrierter DSP-Funktionalität. Darüber hinaus sind mit dem Controller verbundene leistungselektronische Komponenten (z.B. Gleichrichter, Pufferkondensatoren, Treiber und Leistungsschalter) in die BCU integriert. Für die eingesetzten Komponenten steht mit dem Softwarepaket InstaSPIN™-MOTION ein Werkzeug zur Realisierung feldorientierter Antriebsregelungen zur Verfügung, deren Funktionen teilweise bereits im ROM des eingesetzten Controllers umgesetzt sind. Vorteile dieser Lösung sind:

- die sensorlose Ermittlung von Drehwinkel und -moment,
- eine integrierte, automatisierte Identifikation der Motorparameter,
- sowie eine Softwarelösung für den Motorhochlauf,

die schon bei Null-Geschwindigkeit das volle Drehmoment bereitstellt und eine elektronische Winkelbestimmung schon im ersten elektrischen Zyklus ermöglicht. [5] Mit Hilfe des Labormusters konnte das vorgestellte Systemdesign verifiziert und ein einfaches Regelungskonzept an einem fahrtüchtigen Prototyp praktisch erprobt werden.

6 Ausblick

Um das vorgestellte Softwarekonzept weiter verfeinern zu können, soll ein detailliertes Modell des Gesamtsystems erstellt werden. Neben den Komponenten des vorgestellten Hardwarekonzeptes sind darin die Energiebereitstellung durch den Benutzer und die Lastverhältnisse durch das Zusammenspiel von Fahrrad und Umwelt in geeigneter Form abzubilden.
Dieses Modell soll als Ausgangspunkt für den Entwurf eines adaptiven Reglers dienen, um das Fahrverhalten an individuelle ergonomische Anforderung des Benutzers anzupassen.
Die weitere Hardwareentwicklung beinhaltet die Schaffung von drahtgebundenen sowie drahtlosen Schnittstellen, die ein modular erweiterbares Konzept und damit die Realisierung elektronischer Assistenzsysteme durch Einbindung zusätzlicher Sensorik, Benutzerinterfaces und Vernetzung mit der Umwelt ermöglicht.

Literatur

[1] R. Baldessariet et al., Car-2-Car Communication Consortium - Manifesto, 2007. verfügbar unter: https://www.car-2-car.org/ index.php (Abrufdatum: 15.03.2018)

[2] R. Fischer et al., Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik, 30. Hrsg., Europa-Lehrmittel, 2013.

[3] Statista, E-Bikes - Statista-Dossier, 2016.

[4] H. D. Perassi, Feldorientierte Regelung der permanenterregten Synchronmaschine ohne Lagegeber für den gesamten Drehzahlbereich bis zum Stillstand, Technische Universität Ilmenau: Dissertation, 2006.

[5] Texas Instruments, TMS320F28069M, TMS320F28068M InstaSPINTM-MOTION Software Technical Reference Manual, Texas Instruments, 2014. verfügbar unter: http://www.ti.com/lit/ug/spruhj0b/spruhj0b.pdf (Abrufdatum: 15.03.2018)

[6] A. Lucia, J. Hoyos und J. L. Chicharro, „Preferred pedalling cadence in professional cycling," Medicine and science in sports and exercise, Nr. 33 (8), pp. 1361-1366, August 2001.

[7] O. Foss und J. Hallén, „The most economical cadence increases with increasing workload," European Journal of Applied Physiology, Nr. 92 (4-5), pp. 443 - 451, August 2004.

Positionsschätzung mit RTLS Flares für mobile Roboter

Fränzel, N.[1,2]; Greifzu, N.[2]; Schneider, M.[1]; Wenzel, A.[1,2]
[1]Hochschule Schmalkalden
[2]Fraunhofer IOSB, Institutsteil Angewandte Systemtechnik, Ilmenau

1 Zusammenfassung

Die einfache und genaue Lokalisierung in Gebäuden oder in Gebieten mit schlechtem Empfang der Signale von globalen Navigationssatellitensystemen ist nach wie vor eine Herausforderung und stellt häufig hohe Anforderungen an die dafür notwendigen Sensorkomponenten und Algorithmen. Die damit ein-hergehenden hohen Systemkosten verhindern wiederum häufig den Einsatz von mobilen autonomen Robotern bei vielen potenziellen Applikationen. Eine Re-duktion der Systemkosten und -komplexität ist durch den Einsatz der RTLS Flares (Abb. 1) möglich, indem diese die Position von mobilen Systemen mit-hilfe von Ultrabreitbandsignalen und deren Laufzeit von bekannten Referenzpunkten bestimmen können.

Abbildung 1: RTLS Flare als USB-Gerät

2 Stand der Technik

Im Gegensatz zu existierenden Lösungen wie der Abstandsbestimmung durch die Signalstärkenschwächung von Funksignalen, z. B. WLAN oder Bluetooth, kann mit Hilfe von UWB eine höhere Genauigkeit im Zentimeterbereich er-reicht werden [1]. Für eine möglichst genaue Positionsbestimmung muss die Position der Referenzpunkte exakt bekannt sein [2]. Dies erschwert einen einfachen Einsatz und eine schnelle Inbetriebnahme, zumal das Einmessen von Referenzpunkten oftmals aus verschiedenen Gründen nicht möglich ist. Um dennoch eine einfache, schnelle und genaue Positionsbestimmung für mobile Systeme nutzen zu können, wurde ein System entwickelt, das als drahtloses Ad-hoc-Lokalisierungssystem funktioniert und in dem die Referenzmarken automatisch eingemessen und den Netzwerkteilnehmern zur Verfügung gestellt werden.

3 Systembeschreibung

Das System besteht aus den sogenannten RTLS Flares. Die RTLS Flares sind eingebettete Systeme (Abb. 1) mit einem UWB-Transceiver, einem Mikrocontroller, einer Inertialmesseinheit und einer USB-Schnittstelle. Weiterhin sind alle Netzwerkteilnehmer identisch aufgebaut. Der einzige Unterschied zwi-schen den mobilen Systemen und den Referenzmarken ist die Konfiguration und die Güte der eigenen Positionsbestimmungen durch die jeweiligen Module. Die RTLS Flares bauen ein drahtloses Ad-hoc-Netzwerk auf. Die ersten vier Flares bilden die sogenannte Basiszelle des lokalen Koordinatensystems. Weitere Netzwerkteilnehmer arbeiten zuerst als mobile Teilnehmer und können ihre Position relativ zu dieser Basiszelle bestimmen. Sobald diese ihre Position mit einer ausreichenden Güte bestimmt haben, werden sie auch zu Referenzmarken und erweitern somit die Netzwerkabdeckung.

4 Ergebnisse

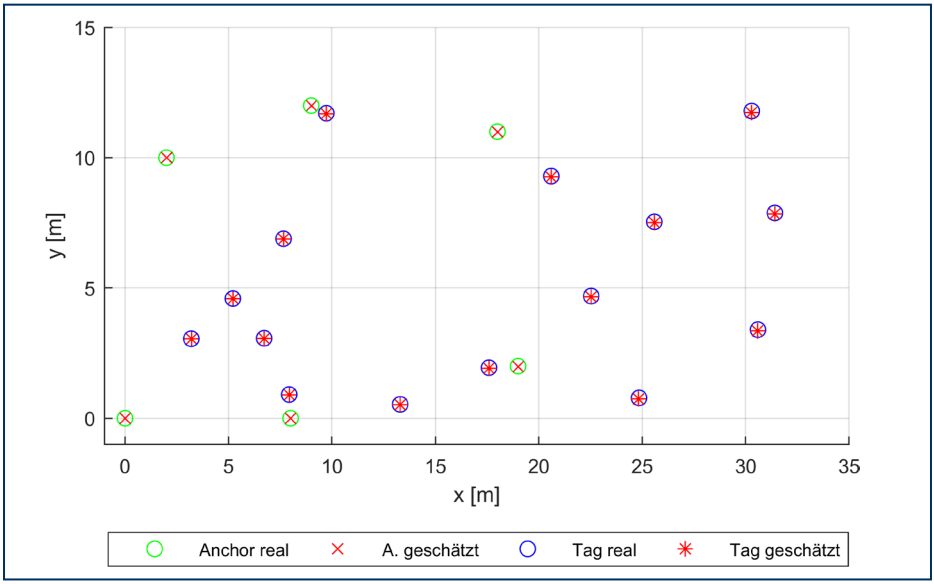


Abbildung 2: Simulierte Positionsbestimmung mit 6 Referenzpunkten

Abbildung 2 zeigt eine simulierte Vermessung von 15 Punkten in einem Raum mithilfe von sieben RTLS Flare-Modulen. Die ersten sechs Flares bauen das Netzwerk auf (Anchor) und ermöglichen die genaue Positionsbestimmung von Modul 7 (Tag) an verschiedenen Messpunkten. Der mittlere Fehler der dreidi-mensionalen Positionsschätzung beträgt 0,32 m bei einer angenommenen Standartabweichung von 0,3 m für die Abstandsbestimmung zwischen zwei Teilnehmern.

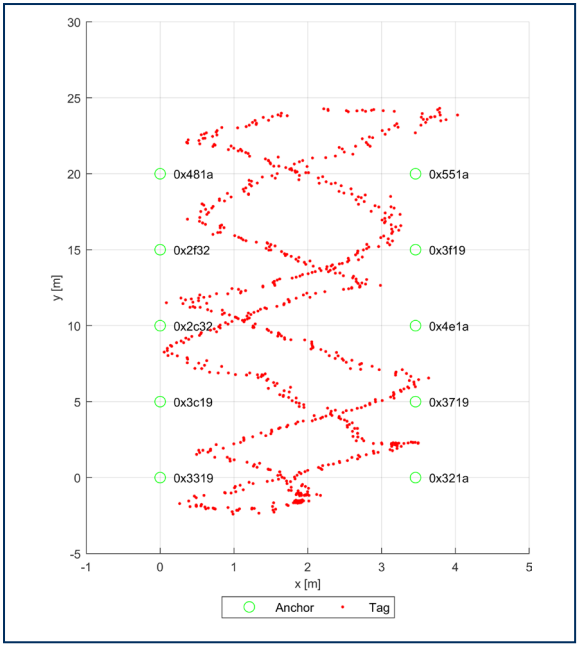


Abbildung 3: Messfahrt mit 10 Referenzpunkten

Abbildung 3 zeigt eine reale Messfahrt mit einem mobilen Roboter in einem Netzwerk mit 10 Anchorn. Die Referenzpunkte befinden sich beidseitig vom Fahrbereich und ermöglichen dem Roboter fortwährend die Positionsbestim-mung. Der Start- und Endpunkt liegt bei circa x = 2 m und y = -1 m.
Die integrierte Lokalisierungsengine erlaubt weiterhin den autonomen Betrieb, d. h. es wird keine zusätzliche externe Rechenleistung benötigt. Hierdurch wird die Steuereinheit der Zielapplikation nicht zusätzlich beansprucht und das lokale Positionierungssystem kann ähnlich einem GPS-Empfänger unkompliziert auch in bestehende Systeme nachträglich integriert werden.

5 Ausblick

Die hier vorgestellten Ergebnisse unter Sichtverbindung zwischen den einzelnen Netzwerkteilnehmern bestätigen die Leistungsfähigkeit des Systems sowohl simulativ als auch experimentell. Die gegenwärtigen Forschungsaktivitä-ten konzentrieren sich auf die Verbesserung der Lokalisierungsverfahren und auf die Erhöhung der Robustheit auch bei einer gestörten Verbindung zu ein-zelnen Referenzstationen.
Die zukünftige Verwendung einer Modellgestützten Datenfilterung soll die Genauigkeit noch weiter verbessern und gegebenenfalls auch eine Positions-schätzung mit einer hohen Ausgaberate ermöglichen, ohne dass in der gleichen Rate gemessen werden muss.

Eine weitere Herausforderung ist das simultane Lokalisieren von mehreren mobilen Systemen mit einer hohen Aktualisierungsrate bei gleichzeitigem gleichberechtigen Netzwerkkanalzugriff. Hierfür muss ein Verfahren gefunden und realisiert werden, das die Kanalnutzung auch in einem dezentralen, verteil-ten Netzwerk koordiniert.

Literatur

[1] DR. Kshetrimayum. “An introduction to uwb communication systems.” in IEEE Potentials, 28(2): S. 9-13, 2009.

[2] A. H. Sayed, A. Tarighat, und N. Khajehnouri, “Network-based wireless location: challenges faced in developing techniques for accurate wireless location information,” IEEE Signal Processing Magazine, vol. 22, no. 4, S. 24–40, Juli 2005.

Modellierung des Reibschweißverfahrens – Ein kurzer Literaturüberblick

Schneider, T.; Pietzsch, R.
Hochschule Schmalkalden

Abstract

Obwohl kaum bekannt, wird das Reibschweißen häufig als Fügeverfahren eingesetzt. Das Pressschweißverfahren ist in der Automobilbranche, der Luft- und Raumfahrttechnik sowie der Schienenfahrzeugindustrie weitläufig verbreitet (Schmicker, et al., 2013). Es gehört zu den sichersten Verbindungsverfahren der modernen Fertigungstechnik. Reibschweißen zählt zu den Fügeprozessen im festen Zustand. Der Beitrag gibt eine Zusammenfassung einer Auswahl der publizierten Untersuchungen zu dem Thema, um den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik im ersten Ansatz zu ermitteln. Dazu werden die Grundlagen zum Verfahren und die bisherigen Erkenntnisse zur analytischen und numerischen Modellierung zusammenfassend diskutiert.

Schlüsselwörter: Schweißsimulation, Reibschweißen

1 Einleitung

Fügen durch Schweißen (Bezeichnung nach DIN 8590) wird als wichtigste Gruppe innerhalb der Fügeverfahren angesehen. Gemäß EN 14610 wird es als „das unlösbare Verbinden von Bauteilen unter Anwendung von Wärme und/oder Druck, mit oder ohne Schweißzusatzwerkstoffe“ charakterisiert. Mit unlösbaren Verbinden ist die Ausbildung eines stoffschlüssigen Verbunds der beteiligten Fügepartner gemeint. Das Schweißen wird unter dem Gesichtspunkt des physikalischen Ablaufs in Schmelzschweiß- und Pressschweißverfahren untergliedert (siehe Abbildung 1).

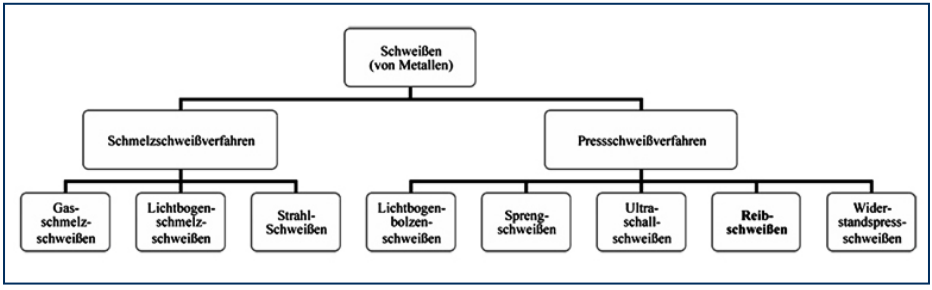


Abbildung 1: Einteilung der Schweißverfahren (eigene Darstellung nach DIN 1910- 100)

Wie die Namensgebung vermuten lässt, erfolgt der Fügevorgang bei den Schmelzschweißverfahren durch Wärmezufuhr bis in den Schmelzbereich. Dahingegen findet die Verbindungsbildung bei Pressschweißverfahren prinzipiell unter Druck und so, „dass die dabei vorliegende Schweißtemperatur von Raumtemperatur beim Kaltpressschweißen bis oberhalb der Schmelztemperatur, z. B. beim Abbrennstumpfschweißen, realisiert werden kann“, statt (Risse, 2012). So erfolgt beim Reibschweißen das Verschweißen im plastischen Zustand. Es wird entsprechend den Pressschweißverfahren zugeordnet. Im Schweißprozess werden zwei Bauteile, die sich druckbehaftet an den Kontaktflächen berühren, relativ zueinander bewegt1. Durch die wirksame Reibung werden die Reibschweiß-Fügeflächen bis in die Schmelze erwärmt. Dabei bilden sich während des Reibvorgangs immer wieder örtlich begrenzte feste Brücken. Im Nahbereich der Fügeebene kommt es zu einem intensiven Austausch des Werkstoffpaares2. Im Anschluss werden die Bauteile zügig präzise zueinander ausgerichtet und unter Druck solange zusammengehalten bis sich eine feste Verbindung ausgebildet hat. Charakteristisch ist dabei die Ausbildung einer Materialwulst, die sich um die Schweißfläche ausbildet (siehe Abbildung 2).

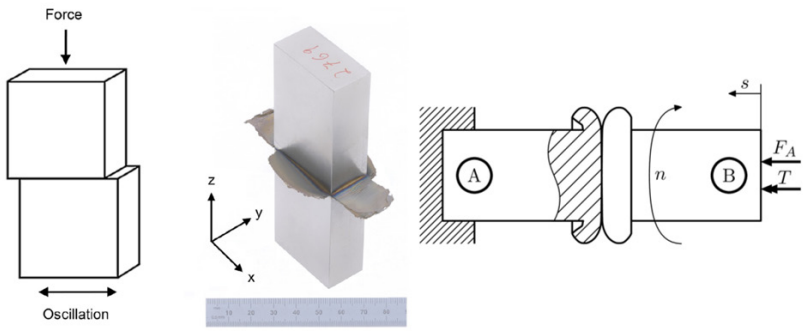


Abbildung 2: (a) Schema Linearreibschweißen, (b) fertig gestellteTi-6Al-4V Schweißung mit Materialwulst und Oszillation in x-Richtung (McAndrew, et al., 2018) und (c) Prinzip Rotationsreibschweißen (Schmicker, et al., 2013)

Je nach Kinematik der Kontaktflächen wird unterschieden in

- Rotationsreibschweißen,
- Linearreibschweißen,
- Orbitalreibschweißen,
- Bogensegmentreibschweißen,
- Zirkularreibschweißen und
- Rotatives Vibrationsreibschweißen.

Zu den Hauptverfahrensparametern des Reibschweißens zählen

- Ausgangslänge
- Relativgeschwindigkeit bzw. Frequenz,
- Reibdruck (Anreibdruck),
- Reibweg und Reibzeit,
- Stauchdruck und Stauchzeit,
- Nachpressdruck und
- Gesamtverkürzung3,4.

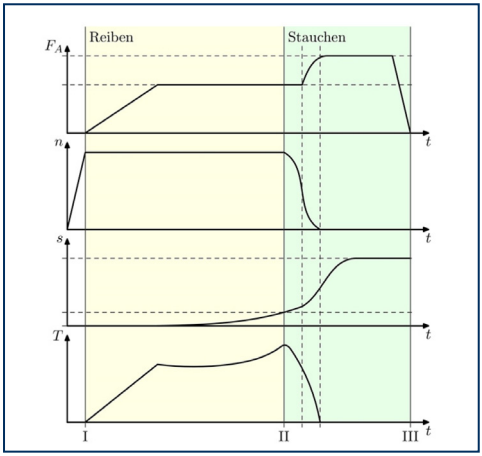


Abbildung 3: Prozessparameterverläufe beim Rotationsreibschweißen (Schmicker, et al., 2013)

In Abbildung 3 ist der Verlauf der Hauptprozessparameter beispielhaft am Rotationsreibschweißen dargestellt. Der Prozess ist in die Reibphase (I-II) und die Stauchphase (II-III) unterteilt. Die Parameter (siehe dazu auch Abbildung 2 (c)) axialer Vorschub s(t), Axialkraft FA(t), Reibmoment T(t) und Drehzahl n(t) verlaufen typischerweise wie in Abbildung 3 dargestellt. Charakteristische Einstellparameter sind das Reib- und Stauchkraftniveau, die Drehzahl und die Reibzeit (Schmicker, et al., 2013).
Gegenüber anderen Schweißverfahren ergeben sich folgende Vorteile. Die Verbindungen weisen eine hohe Festigkeit und Dichte auf und können mit einem Schweißfaktor

nahe 1 bewertet werden. Der Reibschweißprozess lässt sich leicht automatisieren und der Verbindungsvorgang erfolgt mit Taktzeiten von wenigen Sekunden. Insbesondere ist an dieser Stelle die deutlich schmalere Wärmeeinflusszone im Vergleich zu anderen Verfahren zu erwähnen. Der Wärmeeintrag in den Werkstoff erfolgt auch nur dort, wo er erforderlich ist. Wo bei anderen Schweißverfahren die flüssige Phase der Werkstoffpaarung üblicherweise erreicht wird, ist beim Reibschweißen ein Erhitzen über die Schmelztemperatur hinaus nicht möglich (Schmicker, et al., 2013). Bei allen Prozessen erfolgt die stoffschlüssige Verbindung durch Diffusionsvorgänge und die Ausbildung von intermetallischen Phasen unter hohem Druck und erhöhter Temperatur (Schmicker, et al., 2013).

Neben Metalllegierungen können auch andere Materialien reibgeschweißt werden. So wird Kunststoffreibschweißen in der Serienfertigung durchgeführt, unter anderen das Reibschweißen von spritzgegossenen, extrudierten oder blasgeformten Formteilen1. Fast jedes thermoplastisches Material kann verbunden werden (einschließlich verstärkte, strukturgeschäumte, kristalline und amorphe Materialien)3. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit artverschiedene Materialien zu fügen.

So sind die Kombinationen

- Thermoplast A + B,
- Metall A + B,
- Holz + Holz,
- Holz + Kunststoff und
- Thermoplast und Duroplast

denkbar.

[1] http://www.fischer-st.de/schweissverfahren/

[2] http://www.umformtechnik.net

[3] http://www.twi.co.uk/content/pjkfwplast.html

[4] http://www.lohnreibschweissen.de

2 Reibschweißsimulation

Aufgrund der Koppelung von Vorgängen des Heißumformens, der Wärmeleitung, der Reibung, der Gefügeumwandlung und der Materialdiffusion ist die Reibschweißsimulation eine große Herausforderung (Schmicker, et al., 2013). In der Literatur gibt es sowohl rein thermische als auch thermodynamisch-mechanisch gekoppelte Modellierungsansätze. Währende erst genannte sich ausschließlich mit Wärmeleitungsvorgängen innerhalb der Werkstücke beschäftigen, werden in den gekoppelten Modellen darüber hinaus plastische Verformungen vorhergesagt (Schmicker, et al., 2013), (Koerner & Schmicker, 2015), (Asif. M, et al., 2015), (McAndrew, et al., 2018).

Schmicker et al. stellen in ihrem Beitrag (Schmicker, et al., 2013) zum Simulationsforum 2013 Schweißen und Wärmebehandlung einen neuartigen Modellansatz zur Reibschweißsimulation vor. Die Autoren untersuchen die ablaufenden Prozesse anhand des Rotationsreibschweißens (siehe hierzu Abbildung 2 (c)). Die Relativkinematik der beiden Werkstücke wird hierbei realisiert in dem das aufschweißende Teil in eine rotierende Bewegung zum verdrehgesichert arretierten Fügepartner gebracht wird. Der ganzheitliche Ansatz umfasst ein modifiziertes Careau-Fluid Gesetz zur stetigen Abbildung des Materialverhaltens beim Übergang von fester zu flüssiger Phase. Die Temperaturabhängigkeit dieses Gesetzes wird mit einem Johnson-Cook Potenzansatz kombiniert. Dadurch genügen fundamentale Materialkennwerte wie

- die Fließgrenze,
- die Raumtemperatur und
- die Schmelztemperatur

zur Durchführung qualitativer Simulationen. Damit sind detaillierte Einblicke in das Temperaturprofil und den Materialfluss während des Schweißvorgangs möglich. Das Materialgesetz wurde in dem selbst entwickelt FE-Code virtua RFW innerhalb von Matlab implementiert. Die räumliche Diskretisierung erfolgt über 6-Knoten Lagrange formulierte finite Dreieckselemente. Aufgrund der axialen Symmetrie genügte eine 2,5D Formulierung. Das Abbilden von großen plastischen Deformationen wird durch aufwendige Neuvernetzungsstrategien basierend auf den Implicit Geometry Meshing Routinen von Persson möglich.

Abbildung 4 zeigt eine gerenderte Animation der Simulationsergebnisse. Das Modell ist in der Lage, die Wulstformung in der Reib- und Stauchphase des Prozesses vorherzusagen.

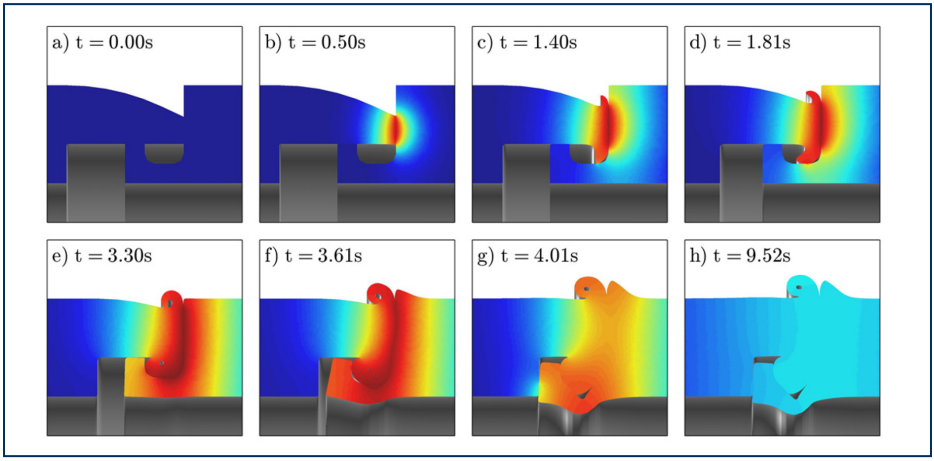


Abbildung 4: Animation der Simulation (Schmicker, et al., 2013)

McAndrew et al. fassen in „A literature review of Ti-6Al-4V linear friction welding“ (McAndrew, et al., 2018) den aktuellen Stand der Wissenschaft zum Linearreibschweißen von Titanium-Strukturkomponenten der Luft- und Raumfahrt zusammen.

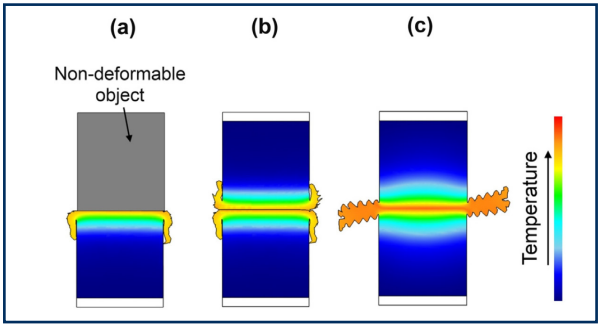


Abbildung 5: Simulation Linearreibschweißprozess mit seitlichen Materialausstrom (Blitzfließen) (McAndrew, et al., 2018)

Die rechnergestützte Simulation bietet die Möglichkeit Erkenntnisse zu gewinnen, die praktisch nur schwierig im Experiment bestimmt werden können. Im speziellen sind dabei Phänomene in der Schweißnaht, wie die Temperatur oder der Deformationsverlauf, gemeint. Denn die Oberfläche kann während des Schweißvorgangs nicht beobachtet werden, zumal der Vorgang sehr schnell abläuft.

Bisherige Arbeiten zur rechnergestützten numerischen Untersuchung des Linerarreibschweiß-Prozesses nutzen die Finite-Element-Methode (FEA). Dazu stehen einige FEA-Pakete zur Verfügung, unter anderen: Abaqus, Ansys, DEFORM, Elfen, Forge und Matlab. Untersucht wurden die Bildung von Eigenspannungen, Dehnungsraten, Blitz-

morphologie (seitlicher Materialausfluss an der Reibfläche siehe Abbildung 5), Blitzbildungsraten und thermische Felder im Werkstück.
Es ergeben sich einige Felder für weiterführende Forschung. Modelle könnten zur Untersuchung des Einflusses der Prozessparameter und bedingungen auf die mikrostrukturellen Veränderungen genutzt werden. Im System der Ti-Al-V Legierungen sind beispielsweise die Effekte auf die allotrope Phase, die durchschnittliche Korngröße in der Wärmeeinflusszone, Kornmikrostruktur und Korngrößenverteilung.

Weiterhin muss der Einfluss der Werkstückgeometrie, der Reibgeschwindigkeit und des Stauchdrucks auf die Bildung, Verteilung und Größenordnung von Eigenspannungen untersucht werden. Dabei kann auch der Einfluss von nachgelagerten Wärmebehandlungen berücksichtig werden.

Die Untersuchungen müssen auf weitere Materialien, wie Aluminium-, Aluminium-Lithium-Legierungen und Nickel-basierte Superlegierung, erweitert werden (McAndrew, et al., 2018).

Literatur

Asif. M, M., Shrikrishana, K. A. & Sathiya, P., 2015. Finite element modelling and characterization of friction welding on UNS S31803 duplex stainless steel joints. Engineering Science and Technology, an International Journal.

Koerner, M. & Schmicker, D., 2015. Anwendungsfälle der Prozesssimulation anhand des Reibschweißverfahrens.

McAndrew, A. R. et al., 2015. Modelling the influence of the process inputs on the removal of surface contaminants from Ti-6Al-4V linear friction welds. Materials and Design.

McAndrew, A. R. et al., 2018. A literature review of Ti-6Al-4V linear friction welding. s.l.:s.n.

Risse, A., 2012. Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätetechnik. 1 Hrsg. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

Schmicker, D., Naumenko, K. & Strackeljan, J., 2013. Potenziale der Prozesssimulation beim Rotationsreibschweißen.

Methodik zur Schneidprozessanalyse am Beispiel eines selbstfahrenden Feldhäckslers

Luise Merbach [1]; Manuel Schneider [1]; Martin Schweigel [1]; Andreas Wenzel [1], [2];
Florian Pforte [3]; Oliver Hensel [3]

[1] *Hochschule Schmalkalden, Forschungsgruppe Eingebettete Diagnosesysteme, Blechhammer 9, 98574 Schmalkalden*

[2] *Fraunhofer- Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung, Am Vogelherd 50, 98693 Ilmenau*

[3] *Universität Kassel, Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften, Fachgebiet Agrartechnik, Nordbahnhofstrasse 1a, 37213 Witzenhausen*

Abstract:

Die Ernte von Mais-, Gras- und Ganzpflanzensilage als Biogassubstrat oder Futtermittel mit einem selbstfahrenden Feldhäcksler soll möglichst energieeffizient bei gleichzeitig hoher Schnittqualität erfolgen. Dies bedeutet in der Regel, sobald aufgrund verschlissener Messer nicht mehr die geforderte Schnittqualität produziert werden kann bzw. wenn der Energieverbrauch des Feldhäckslers zu hoch wird, werden die Messer geschliffen. Um die Messer zum richtigen Zeitpunkt, also nicht zu früh oder zu spät zu schleifen, ist eine entsprechende Schneidprozesssteuerung notwendig, welche eine online- Prozessanalyse zur Grundlage hat. Aufgrund des komplexen Zusammenspiels verschiedener und teilweise nicht vorhersehbarer Einflussfaktoren mit unterschiedlicher Wirkungsstärke während des Schneidens ist derzeit eine solche Prozessanalyse in einem selbstfahrenden Feldhäcksler online nicht vollumfänglich möglich. In diesem Artikel wird eine methodische Vorgehensweise vorgestellt, welche die Schnittqualität, als Ergebnis des Schneidprozesses, zum vorhandenen Messerzustand, als eine Steuergröße, korreliert. Die so ermittelte Datenbasis soll es ermöglichen, ein Onlineverfahren zur Prozessanalyse und Steuerung in einem selbstfahrenden Feldhäcksler entwickeln zu können.

1. Analyse des Schneidprozesses in einem selbstfahrenden Feldhäcksler

Die Untersuchung des Schneidprozesses in einem selbstfahrenden Feldhäcksler hat das Ziel, das Schnittergebnis (Schnittgüte, Zerkleinerungsgrad) mit möglichst geringem Energieaufwand zu erreichen. Derzeit ist es aufgrund der Vielfalt und der Zufälligkeit der Einflussparameter nicht möglich, eine genaue Systembeschreibung mitsamt allen relevanten Einflussgrößen direkt im Ernteprozess, also unter realen Bedingungen vorzunehmen [1]. Somit können prozessoptimierende Eingriffe, wie beispielsweise das Schleifen der Messer, derzeit lediglich aufgrund von subjektiven Abschätzungen und

Erfahrungswerten des Fahrers vorgenommen werden. Um die Prozessabläufe während des Schneidens optimieren zu können, müssen die internen (komplexen) Systemzusammenhänge verstanden werden. Erst dann kann der Schneidprozess vollständig mit allen Einflussgrößen und deren Wirkungen auf den Häckselprozess beschrieben und durch gezielte Eingriffe an richtiger Stelle gesteuert werden.

1.1. Erläuterung des Schneidprozesses

Am Beispiel des Häckselaggregates eines Trommelfeldhäckslers CLAAS JAGUAR 980-930 (Abbildung 1) wird der Schneidprozess systematisch untersucht. Das Erntegut wird mit einem spezifischen Vorsatz vom Feld aufgenommen und den Einzugswalzen (1) zugeführt. In Kombination mit den Vorpresswalzen (2) wird das Erntegut zu einer Matte mit definierter Höhe verdichtet und dem Schneidsystem, bestehend aus Gegenschneide (3) und Messertrommel (4) zugeführt und geschnitten. Aufgrund der schaufelförmigen Form der Messer wird das geschnittene Erntegut zur Nachzerkleinerung zum Corn Cracker (5) „geworfen“. Der nachgelagerte Beschleuniger (6) befördert das Erntegut durch den Auswurfkrümmer.
Während der Ernte verschleißen die eingesetzten Messer, was sich in der Änderung der Schneidengeometrie in Folge fortschreitenden Materialabtrags aufgrund von Reibungsvorgängen z.B, zwischen Erntegut und Messern, äußert. Der Trennvorgang geht vom Schneiden hin zu einem Quetschen und Reißen über. Hierdurch verschlechtert sich das Schnittergebnis und der Schneidprozess wird zunehmend ineffizient. Für einen effizienten Schneidprozess müssen die Messer demnach möglichst lange scharf, d.h. gut und leicht schneidend sein.
Durch Schleifen der verschlissenen Messer wird die „scharfe“ Messergeometrie wiederhergestellt. Dabei wird der Schleifzeitpunkt bisher nach subjektiven Gesichtspunkten vom Häckslerfahrer festgelegt ohne den tatsächlichen Messerabnutzungsgrad oder die herrschenden Erntebedingungen berücksichtigen zu können, wodurch die Gefahr des zu frühen oder späten Schleifens besteht. Der optimale Schleifzeitpunkt muss jedoch abhängig vom tatsächlich vorliegenden Messerzustand bestimmt werden [17].

1. erntegutspezifischer Vorsatz (ohne Abb.)

2. Einzugswalzen (vorne) und Vorpresswalzen (hinten)

3. Gegenschneide

4. V-MAX Messertrommel

5. MULTI CROP CRACKER

6. Beschleuniger

Abbildung 1: Häckselaggregat eines Trommelfeldhäckslers CLAAS JAGUAR 980-30 [2]

1.2. Beurteilungskriterien für den Schneidprozess

Ein Schneidprozess kann nach FEILER allgemein anhand der Schnittqualität, den im System wirkenden Schneidkräften und der Schneidhaltigkeit der verwendeten Werkzeuge beurteilt werden. Diese werden vom Schneidverfahren, dem Schnittgut und dem Werkzeugwerkstoff beeinflusst. In Abbildung 2 sind die komplexen Zusammenhänge der genannten Beurteilungskriterien innerhalb eines Schneidsystems dargestellt, ohne jedoch die Einflussstärke der einzelnen Parameter auf das Schneidsystem und dessen Verschleiß abzubilden (nach [3]).

Aufgrund der hohen Systemkomplexität und der Vielfältigkeit bzw. der zeitlichen Veränderlichkeit der Einflussgrößen während des Ernteprozesses ([4], [5], [6]) reichen allein die Schnittqualität und die Schneidkräfte als Analysegrundlage für den Schneidprozess nicht aus. Auf Grundlage verschiedener physikalischer Prinzipien wurden mehrere Analysevarianten von Schneidprozessen entwickelt ([7]-[14]), führen allerdings nicht zu aussagekräftigen Ergebnissen ([16], [17]).

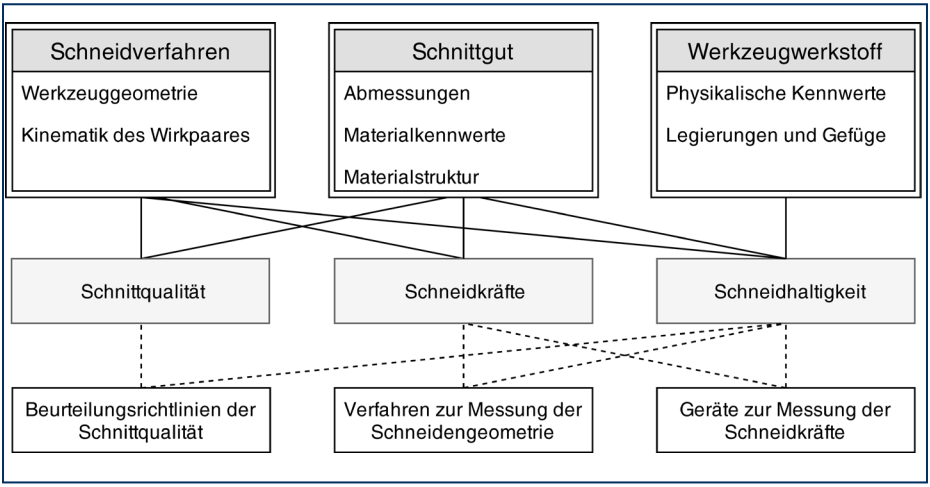


Abbildung 2: Einflussfaktoren auf den Schneidprozess nach FEILER (eigene Darstellung nach [3])

Weitere Möglichkeiten der Systemanalyse sind die Erfassung des Zusammenhanges zwischen zunehmenden Schneidenradien und zunehmenden Schnittkräften sowie die makroskopische Analyse des Schneiden- bzw. Messerzustandes. ([1], [4]) Akustische Signale können ebenfalls als Indikator für den Schärfegrad von Messern in einem bewegten Schneidsystem genutzt werden ([17]-[19]) und mittels selbstlernender Software – Algorithmen beurteilt werden ([18]-[20]).

1.3. Relevante Beurteilungskriterien zur systematischen experimentellen Analyse des Schneidsystems eines Feldhäckslers

Für die detaillierte Analyse des Schneidsystems eines Feldhäckslers ist eine Kombination aus Ernte- und Laborversuchen erforderlich [1], [4]. Um die oben genannten Einflussflaktoren in ihrer Einflussstärke im Schneidsystem und somit ihrer Relevanz für die Versuchsdurchführung einschätzen zu können, wurde basierend auf Literatur und Praxiserfahrungen eine Sensitivitätsanalyse des Schneidsystems durchgeführt [1]. Diese wird aufgrund gewonnener Daten und Erkenntnissen stetig fortgeführt und optimiert. Ein Ergebnis dieser Analyse ist die in Abbildung 3 dargestellte Rollenverteilung der Einflussfaktoren im Schneidsystem eines Feldhäckslers. Hierin werden die bisherigen Annahmen bestätigt, dass beispielsweise die Schnittkante (13) und der Zerkleinerungsgrad (14) des Schnittgutes als Beurteilungskriterium für die Qualität des Schnittergebnisses, stark von anderen Komponenten abhängig sind, selbst keine Wirkung im System haben und demnach gut als Beurteilungskriterium für den Zustand des Systems genutzt werden können. Um dies zu realisieren, muss das Schnittergebnis während des Prozesses erfasst werden und dessen Auswertung standardisiert werden. Weiterhin wird der Messerzustand (8) als sanfter Korrekturhebel identifiziert, welcher Störungen auffängt und rasch dazu führt, das System wieder ins Gleichgewicht zu bringen, d.h. ein entsprechendes Schnittergebnis zu produzieren, ohne etwas an der Systemkonstellation zu ändern. Um diesen Korrekturhebel nutzbar zu machen, muss der Messerzustand ebenfalls während des Prozesses erfasst werden und eine entsprechende Auswertung etabliert werden.

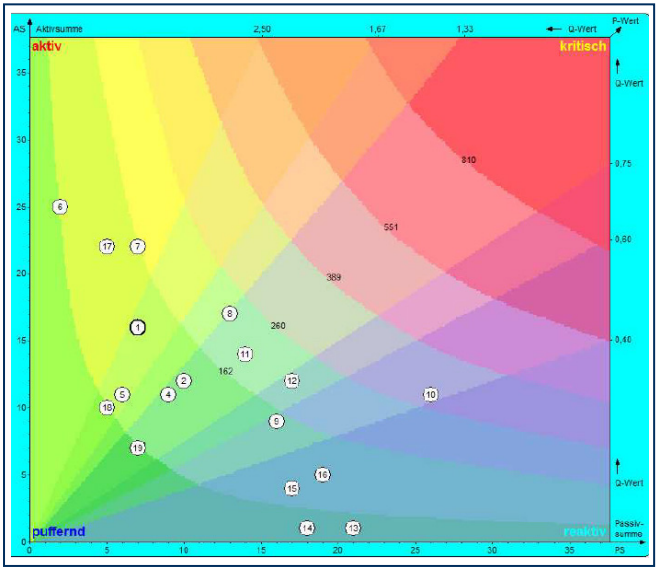


Abbildung 3: Rollenverteilung im Schneidsystem eines Feldhäckslers [1]

2. Methodik zur experimentellen Analyse des Schneidsystems eines selbstfahrenden Feldhäckslers

Das erreichte Schnittergebnis wurde als ein Indikator für die Qualität des Schneidprozesses in einem Feldhäcksler identifiziert. Dieses ist abhängig vom Messerzustand (verschlissen oder geschliffen) und der Art und dem Zustand des Erntegutes. Demnach ist es für die Analyse des Schneidprozesses in einem Feldhäcksler sinnvoll, Messerzustand und das jeweilige Schnittergebnis in Feldversuchen zu erfassen, auszuwerten und miteinander zu korrelieren. Hierfür wurde in einem von der landwirtschaftlichen Rentenbank geförderten Forschungsprojekt eine entsprechende Methodik entwickelt, welche zum Ziel hat, Messerzustand und Schnittergebnis und das Schwingungsverhalten des Schneidsystems während des Schnittes miteinander korrelieren zu können. In Abbildung 4 ist der schematische Ablauf der entwickelten Versuchsmethodik dargestellt.

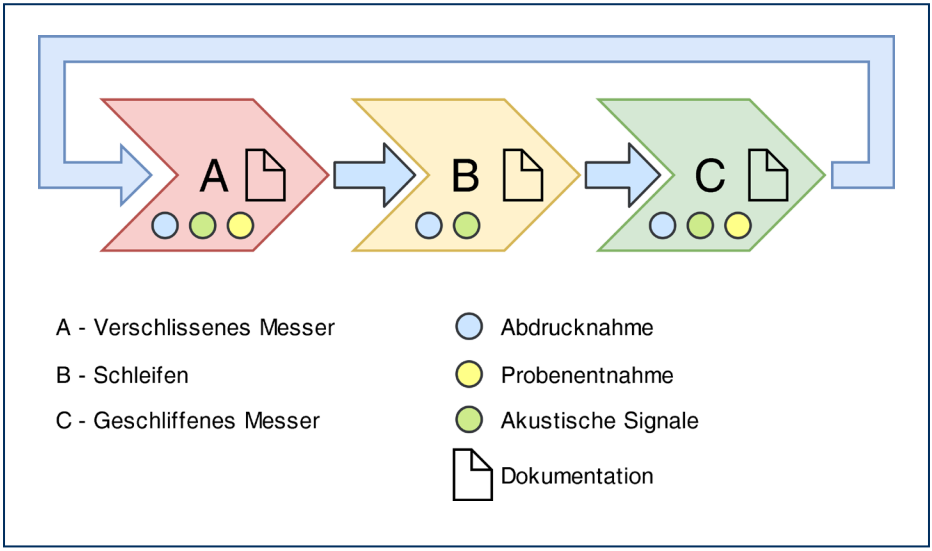
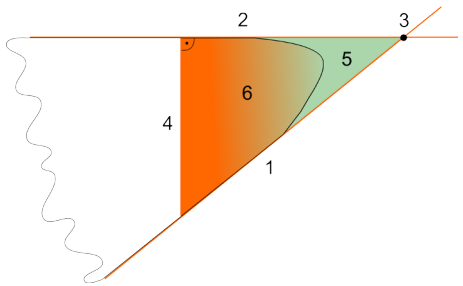


Abbildung 4: Schematische Darstellung der experimentellen Methodik zur Analyse des Schneidsystems eines selbstfahrenden Feldhäckslers

Um die Zustandsänderung der verschleißenden Messer während der Ernte zu dokumentieren, werden in Feldversuchen zu definierten Zeitpunkten Duplikate der Originalmesser mittels Abdruckverfahren angefertigt [21]. Parallel hierzu werden Schnittgutproben entnommen, um das erreichte Schnittergebnis mit dem vorliegenden Verschleißgrad des Messers korrelieren zu können (A/C). Das Schärfen der Messer (B) wird ebenfalls mit dem Abdruckverfahren während des Schleifens dokumentiert. Zusätzlich werden in allen Abschnitten der Analysemethode Schwingungssignal des Schneidsystems aufgezeichnet. Dadurch kann der Unterschied zwischen verschlissenen und geschärften Messer technisch messbar gemacht werden. Der Messerzustand, das Schnittergebnis und die akustischen Signale werden im weiteren Projektverlauf miteinander korreliert. Dies bildet die Grundlage für eine effizientere Nutzung der Werkzeuge und der Optimierung des Schleifprozesses.

2.1. Analyse des Messerzustandes

Die angefertigten Messer-Duplikate werden mittels 3D-Scan für die anschließende Bewertung des Verschleißzustandes der Messer digitalisiert. Für die Auswertung des fortlaufenden Verschleißzustandes wird die relative Fläche des realen Messerquerschnitts bezogen auf den idealen Messerquerschnitt berechnet [22]. Die hierfür notwendigen Kenngrößen sind in Abbildung 5 dargestellt.



1. Untere Regressionsgerade

2. Obere Regressionsgerade

3. Schnittpunkt der Geraden

4. resultierende Lotrechte

5. Ideale Dreiecksfläche

6. Reale Querschnittsfläche des digitalisierten Schneidenabdrucks

Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Querschnittsebene eines Schneidenabdrucks [22]

Die untere Regressionsgerade (1) an der Querschnittskontur und die obere Regressionsgerade des gehärteten Schneidenrückens (2) bilden einen Schnittpunkt (3). Dieser dient als Bezugspunkt zur Bestimmung einer lotrechten Gerade (4) entlang der Schneidengeometrie. Das rechtwinklige Dreieck (5) entspricht dem idealen Messerquerschnitt. Aus der Differenz zwischen Schneidenfläche (6) und idealisierten Dreieckfläche (5) wird die relative Verschleißfläche berechnet. Diese entspricht die Schneidenkontur bis zur berechneten Lotrechten (4). Mit dieser Methode ist eine robuste und schnelle Auswertung des aktuellen Messerverschleißes ohne die Verwendung von Hilfsgeometrien möglich.

2.2. Analyse des Schnittergebnisses

Das Schnittergebnis ist maßgeblich vom Zustand des Schneidsystems, d.h. vom Abnutzungsgrad der verwendeten Messer und der Art des Erntegutes abhängig. Die Qualität des Schnittergebnisses bei Mais wird bisher anhand des Zerkleinerungsgrades und der Anzahl der nicht angecrackten Körner bestimmt. Das heißt nach Bewertungsmaßstäben des Herstellers müssen 45 % des Schnittgutes nach dem Aussieben mit einem Kaskadensieb innerhalb der am Häcksler eingestellten Schnittlänge liegen. Zusätzlich dürfen nicht mehr als 2 ganze Körner in einem Testvolumen von ca. 1 Liter vorkommen [23].
Je verschlissener die Messer sind, desto mehr Anteile von Überlängen sind in der Gesamtprobe zu erwarten. Die Auswertung des Schnittergebnisses bei Gras erfolgt analog zur Schnittlängenanalyse der Maisbewertung. Für die Analyse des Schnittgutes werden mehrere Proben des Ernteguts im jeweiligen Analyseschritt (siehe Abbildung 4) entnommen. Diese Proben, zum Beispiel aus dem Analyseschritt A, bilden die Gesamtprobe für die nachfolgenden Untersuchungen. Für jeden Analyseschritt muss eine separate Gesamtprobe angefertigt werden. Hierbei ist auf eine ordnungsgemäße Dokumentation der Probenentnahme und Abdruckanfertigung zu achten. Wird ein neuer Analyseschritt begonnen, muss der Zeitpunkt in die Dokumentation eingetragen und eine neue Gesamtprobe und gegebenenfalls Abdruckerstellung durchgeführt werden. Übersteigt die Gesamtprobe die Kapazität der nachgelagerten Messeinrichtungen oder ist abzusehen, dass eine signifikante Erhöhung des Analyseaufwands entsteht, dann muss eine statistisch korrekte Separation in Teilproben realisiert werden. Hierfür kann zum Beispiel ein auf die Probengröße angepasstes Streifenteilungsverfahren nach [24] angewendet werden. In Abbildung 6 sind die vorgesehenen Analysemethoden mit den zu erwartenden Versuchsergebnissen dargestellt.

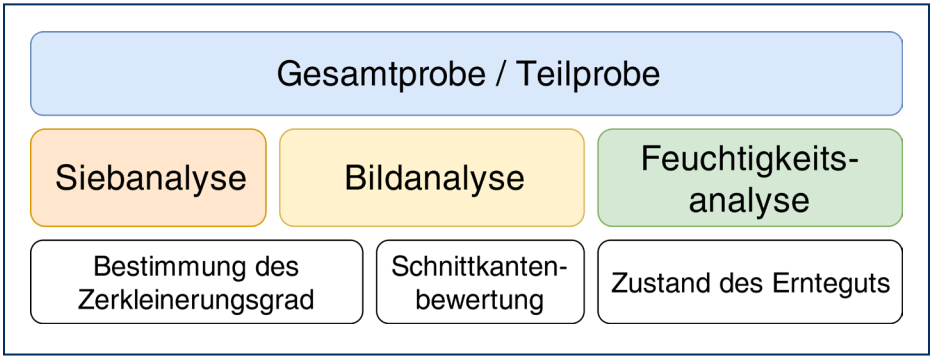


Abbildung 6: Analysemethoden und Versuchsergebnisse für Schnittgutproben

Der Zerkleinerungsgrad wird mittels Siebanalyse im Labor ermittelt. Hierbei orientieren sich die gewählten Maschenweiten der Siebe an den Vorgaben des Herstellers, um vergleichbare Ergebnisse erzielen zu können. Für die Siebanalyse kann der in Abbildung 7 dargestellte Versuchsaufbau in Form eines Siebturmes verwendet werden.

Um den Zustand des Erntegutes charakterisieren zu können, wird der Feuchtigkeitsgrad als ein maßgeblicher Indikator mittels einer Feuchtigkeitswaage ermittelt.

Des Weiteren wird ein Verfahren zur Bildanalyse entwickelt. Hierfür muss die Teilprobe manuell oder automatisiert vereinzelt und die Einzelteile des Häckselgutes fotografiert werden. Der Zerkleinerungsgrad der Probe wird anhand des Verhältnisses Umfang zu Fläche der Einzelteile charakterisiert. Die Ergebnisse werden mit dem in der Siebanalyse ermittelten Zerkleinerungsgrad verglichen. Zusätzlich zum Zerkleinerungsgrad wird die Schnittkante des Erntegutes mittels Bildanalyse ausgewertet, da vermutet wird, dass diese sich mit schlechter werdenden Messerzustand von einem geraden, glatten zu einem aufgefaserten, gerissenen Schnittbild entwickelt.

Es werden Grasteilchen (Abbildung 8) bzw. Maisteilchen (Abbildung 9) aus einer Teilprobe entnommen und einzeln fotografiert. Um einen Einfluss des Feuchtegrads der Teilprobe auf die Ergebnisse der Bildanalyse ausschließen zu können, muss im Vorfeld dieser Untersuchung der Feuchtegehalt der Probe bestimmt werden.

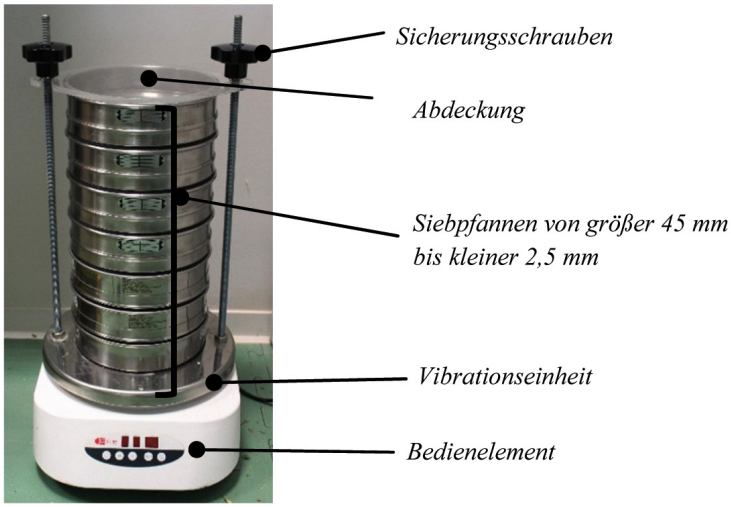


Abbildung 7: Versuchsaufbau Siebanalyse zur Ermittlung des Zerkleinerungsgrades von Schnittgutproben

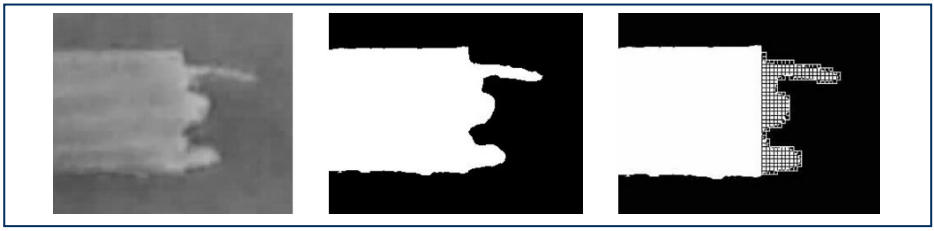


Abbildung 8: Beispiel zur Abfolge der Schnittkantenbewertung mittels Bildanalyse von Gras (v.l.n.r. Fotografie, Binärbild, Binärbild mit Raster auf der Schnittkante)

Die Fotografie wird mittels Bildanalyse Software in ein Binärbild mit hohem Kontrast überführt. Mittels eines Rasters, welches über die relevante Schnittkante (jeweils rechts im Bild) gelegt wird, soll die Schnittkante berechenbar gemacht werden. Die Anzahl der Zeilen und Spalten des Rasters können in eine Bewertungsmatrix überführt und im Anschluss ausgewertet werden.

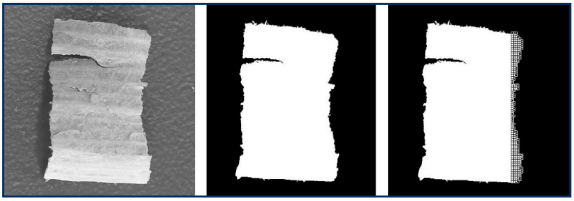


Abbildung 9: Beispiel zur Abfolge der Schnittkantenbewertung mittels Bildanalyse (v.l.n.r. Fotografie, Binärbild, Binärbild mit Raster auf der Schnittkante)

3. Fazit und Ausblick

Es wurde eine Methodik entwickelt, um den Verlauf des Verschleißzustandes von Messern in einem Feldhäcksler- Schneidsystem und den daraus resultierenden Schnittergebnissen während der Ernte von Gras oder Mais zu dokumentieren. Darauf aufbauend sind Versuchsabläufe und Auswertungsalgorithmen definiert worden, welche in der weiteren Auswertung der angefertigten Proben zur Anwendung kommen. Die so generierte Datenbasis kann in Verbindung mit weiteren Prozessdaten, bspw. Schwingungsverhalten der Messertrommel oder Energiebedarf des Feldhäckslers, für die Entwicklung eines Online- Messsystems zur Prozessanalyse in einem selbstfahrenden Feldhäcksler verwendet werden. Dies ermöglicht aufgrund korrelierter Informationen des Systemzustandes eine bedarfsgerechte Optimierung des Schleifprozesses. Somit könnte erstmalig der Schleifprozess in einem selbstfahrenden Feldhäcksler hinsichtlich Schnittergebnis oder Energiebedarf aufgrund der Prozessanalyse hin optimiert werden.

rentenbank

Die Förderung erfolgte aus Mitteln des Zweckvermögens des Bundes bei der Landwirtschaftlichen Rentenbank.

Literatur

[1] Merbach, L.; Beneke; F.; Schweigel, M.; Hartwig, S.: Systematische Untersuchung der Einflüsse auf Schneidprozesse in einem Feldhäcksler; NWK 17, Hochschule Schmalkalden

[2] CLAAS KGaA mbH; http://www.claas.de/produkte/feldhaecksler/jaguar980-940-lrc/gutfluss, 10.03.2018

[3] Feiler, M.: Ein Beitrag zur Klärung der Vorgänge beim Schneiden dünner flächiger Materialien, Dissertation, Universität Stuttgart 1970

[4] Merbach, L.; Beneke F.; et.al: Systematical analysis of the influences on the wear on cutting knives; 73.Internationale LAND.TECHNIK AgEng ; Hannover, 06./ 07. November 2015

[5] Heinrich, André: Grundlagen für ein Messsystem zur Bestimmung des Verschleißzustandes des Häckselaggregates eines Feldhäckslers, TUDpress, Dresden 2007

[6] Haffert, Andreas: Der Schnittvorgang in einem selbstfahrenden Feldhäcksler. Forschungsberichte des Instituts für Landmaschinen und Fluidtechnik, Shaker Verlag, Aachen 2004

[7] DE 10 2009 029 675 A1: Einrichtung und Verfahren zur Erfassung der Schärfe von Häckselmessern. Offenlegungsschrift vom 27.05.2010

[8] DE 10 2011 005 317 A1: Messsystem zur Ermittlung des Verschleißzustandes von Häckselmessern. Offenlegungsschrift vom 13.09.2012

[9] DD 286 735 A5: Verfahren zum Feststellen der Schärfe von Häckselmessern. Ausschließungspatent, 27.10.1983

[10 DE 42 18 799 A1: Verfahren zur Verschleißerkennung an Werkzeugmaschinen durch dynamische Kraftmessung mittels magnetoelastischen Effekts. Offenlegungsschrift vom 16.12.1993

[11] DE 20 2006 003 565 U1: Kreismesserhalter mit Verschleißerkennung der Messerschneiden. Gebrauchsmusterschrift vom 14.06.2003

[12] DD 239 369 A1: Anordnung zur automatischen Überwachung von ein- und mehrschneidigen Werkzeugen an Bearbeitungsmaschinen. Patent vom 24.09.1986

[13] DE 38 28 101 C2: Vorrichtung zur Überwachung rotierender Werkzeuge

[14] DE 20 2005 003 279 U1 2005.06.01: Vorrichtung zur Überwachung des Messerverschleißes an einer Längsschneidemaschine

[15] DE 43 16 473 C2 : Vorrichtung zur Körperschallaufnahme von Werkstücken, Werkzeugen oder deren Spannvorrichtung für die Überwachung des Werkzeug-zustandes

[16] Fraunhofer IST: Praxistaugliche Dünnschichtkraftsensoren zur Überwachung von Schneidprozessen. Jahresbericht 2010

[17] Merbach, Luise: Akustische Messerzustandserkennung. Machbarkeitsstudie, Bachelorthesis, Fachhochschule Schmalkalden, 2013

[18] Siebald, Hubertus: Körperschallmessungen Feldhäcksler CLAAS Jaguar 950. akustische Messerschärfezustandserkennung. Messbericht. Universität Kassel, Witzenhausen. Agrartechnik Witzenhausen, 2012

[19] Siebald, Hubertus: Akustische Echtzeit- Erkennung des Messerzustandes in Feldhäckslern; Dissertation; Universität Kassel; Agrartechnik Witzenhausen; Witzenhausen 2016

[20] Walther, Christian; Beneke, Frank; Merbach, Luise; Siebald, Hubertus; Hensel, Oliver; Huster Jochen: Machine-specific Approach for Automatic Classification of Cutting Process Efficiency, ML4CPS, Lemgo

[21] Hartwig S. (2016): Projektarbeit: Entwicklung eines Verfahrens zum Kopieren von Schneiden in einem Feldhäcksler, Masterprojekt, HS Schmalkalden.

[22] M. Schneider, M. Schweigel, C. Walther, L. Merbach, S. Hartwig, A. Wenzel, F. Beneke, J. Huster: Erfassung des realen Messerzustandes von selbstfahrenden Feldhäckslern unter Verwendung automatisierter Bildauswertung; Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 90, ISSN 0947-7314; Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB)

[23] CLAAS Vertriebsgesellschaft mbH: Häckselqualität –worauf es ankommt; Broschüre; Harsewinkel, 2015

[24] Technisches Komitee CEN/ TC 335, CEN/TC 14780:2005 (D) Feste Biobrennstoffe – Verfahren zur Probenherstellung

ISSN 0949-1767