

Variabilität und Spezifität als Determinanten für die Leistung mobiler Arbeitsmaschinen in landwirtschaftlichen Prozessen

Thilo Steckel, Willi Nüßer

Im Vergleich zu vielen anderen Branchen haben in der Landwirtschaft die eingesetzten Maschinen häufig geringe Auslastungsgrade. Die real erreichte Leistung weicht im Mittel erheblich von der maximal möglichen Leistung ab. Die Einflussfaktoren dieser Leistungslücke, Maschinen-Spezifität und Umgebungsvariabilität, werden im vorliegenden Artikel systematisch abgeleitet. Daraus entstehen Ansätze für die Optimierung von Maschinen und technischen Systemen.

Schlüsselwörter

Prozess, Leistung, Variabilität, Spezifität

Leistungslücken in landwirtschaftlichen Prozessen

In landwirtschaftlichen Prozessen sind typischerweise drei Systeme von herausragender Bedeutung: Umweltsysteme, technische Systeme und soziale Systeme. Für die Durchführung von Prozessen ist es erforderlich, diese Teilsysteme ausreichend genau zu verstehen. Dazu gehören die Erkennung und Beschreibung von Zuständen und Verhaltensweisen einschließlich Prädiktion sowie die Fähigkeit zur Steuerung und Regelung. Je höher das Systemverständnis ist und je besser die Fähigkeit und der Wille zum angepassten Handeln ausgeprägt sind, desto besser lassen sich die in den Prozesszielen definierten Ansprüche an Zeit, Kosten und Qualität erreichen.

Das Verständnis schließt in der Landwirtschaft wie in allen komplexen Systemen eine vertiefte Betrachtung der Wechselwirkungen der drei Teilsysteme ein. In diesem Artikel betrachten wir den Einfluss, der durch die Wechselwirkung von Umgebungsparametern und technischen Fähigkeiten entsteht und der zu einem deutlich messbaren Verlust der faktisch erzielten Leistung von Landmaschinen, einer Leistungslücke, führen kann. Die Umgebung, in der die wertschöpfenden Prozesse in der Landwirtschaft ablaufen, unterscheidet sich dabei deutlich von solchen aus anderen Domänen, wie beispielsweise der Halbleiterproduktion, Automobilfertigung oder Textilverarbeitung. Wesentliche Gründe sind die gleichzeitig hohe Umweltposition, die hohe Komplexität von technischen Systemen und die geringe Arbeitsteilung aufgrund betrieblicher Strukturen. In der Landwirtschaft ist grundsätzlich eine viel höhere Variabilität der Umgebungsparameter zu erwarten als z. B. in geschlossenen Werkhallen. Tatsächlich zeichnen sich viele erfolgreiche industrialisierte Prozesse gerade dadurch aus, dass einzelne Einflüsse ausgeschlossen (z. B. Umweltposition durch Gebäude) oder wirksame Mechanismen zu ihrer Beherrschung etabliert wurden, z. B. die Spezialisierung von Arbeitskräften für bestimmte Anlagen (Abbildung 1).

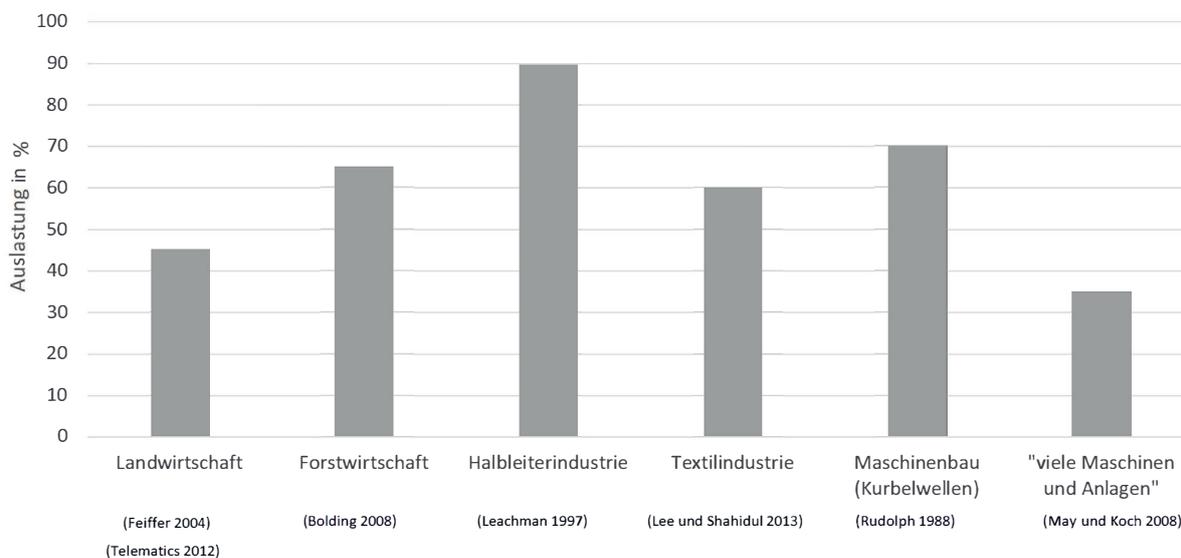


Abbildung 1: Typische Auslastungsgrade der Produktionsmaschinen in verschiedenen Domänen

Die Landwirtschaft ist dadurch geprägt, dass weder Anpassungen an die Umgebung noch die vollständige Definition der Umgebung möglich oder nur schwer realisierbar sind. Dieser Unterschied hat erhebliche Konsequenzen, insbesondere auf das Verhältnis von mittlerer erreichter Leistung von Maschinen und deren bestmöglicher Leistung. Um die Besonderheit der Landwirtschaft darzustellen, kann die industrieweit eingesetzte Metrik der overall equipment effectiveness (OEE) als Näherungsgröße verwendet werden (NAKAJIMA 1988). Die OEE ist dabei definiert als

$$OEE = \text{Verfügbarkeit} \times \text{Leistung} \times \text{Qualität} \quad (\text{Gl. 1})$$

und kann auch verstanden werden als Verhältnis des faktischen, fehlerfreien Produktionsergebnisses zum erwarteten Ergebnis (NÜSSER und STECKEL 2018). Sie ist damit eine Approximation des oben beschriebenen Leistungsverhältnisses. Abbildung 1 zeigt typische Werte für die OEE in verschiedenen Domänen.

Die Werte für die Landwirtschaft entstammen dabei direkten Messungen der Leistung durch FEIFFER (2004). Es ist zu erkennen, dass in der Landwirtschaft nur ca. 45 Prozent der Leistung realisiert werden, die die Landmaschinen unter guten Bedingungen erbringen können. Erwartungsgemäß liegt diese realisierte Leistung in der Landwirtschaft deutlich unterhalb jener in der Industrie. Die Zahlen zeigen, dass mehr als die Hälfte der grundsätzlich verfügbaren Maschinenleistung nicht vom Kunden abgerufen werden kann. Bemerkenswert erscheint die Differenz zur Forstwirtschaft, trotz Ähnlichkeit der Arbeitsumgebung, die ebenfalls mäßig strukturiert bzw. beschreibbar ist. Diese Differenz resultiert unter anderem aus der dort üblichen strikt sequenziellen Abfolge von Teilprozessen, ergo dem Verzicht auf parallele Ausführung von Prozessen und dem damit verbundenen Wegfall von Forderungen nach Synchronisation, die die Leistung beschränken. Sie wird durch die umweltexponierte Lagerfähigkeit des Produktes Holz ermöglicht, die bei landwirtschaftlichen Produkten aufgrund der Verderblichkeit derzeit nicht in gleichem Maße gegeben ist.

In den folgenden Abschnitten wird diese Leistungslücke innerhalb eines neuen Begriffsrahmens genauer untersucht. Dazu definieren Abschnitt 1 und 2 die Kernbegriffe. Abschnitt 3 diskutiert dann die zentralen Konzepte Spezifität und Variabilität an Beispielen, bevor einige Hinweise auf mögliche Optimierungen abgeleitet werden.

Installierte und realisierte Leistung

Die Leistungslücke (ergibt sich als Differenz zwischen bestmöglicher und real erzielter Leistung und lässt sich als Differenz aus installierter Leistung und realisierter Leistung beschreiben (Gleichung 2):

$$\Delta L = L_{inst} - L_{real} \quad (\text{Gl. 2})$$

Sie hängt damit direkt mit der oben erwähnten Kenngröße OEE zusammen (NÜSSER und STECKEL 2018). Die installierte Leistung (L_{inst}) lässt sich mathematisch-physikalisch modellieren. Technische Systeme folgen physikalischen Prinzipien, z.B. Wärmekraftmaschinen denen der Thermodynamik, die für idealisierte Umgebungen auch exakt berechnet werden können. Die installierte Leistung kann in vielen Fällen auf dieser Basis hinreichend genau beschrieben werden. Beispiele sind Kraftwerksanlagen oder Landmaschinen auf Prüfständen. Wenn eine Herleitung der installierten Leistung nicht oder nur eingeschränkt möglich ist, muss auf die empirische Ermittlung von Kennzahlen zurückgegriffen werden. Hierzu können z. B. Benchmarks genutzt werden, für die die Leistung einer Maschine oder eines gesamten Prozesses in wohldefinierten Umgebungen gemessen wird.

Im realen Betrieb wird das Niveau der installierten Leistung aus vielfältigen Gründen niemals erreicht. Diese Erfahrung haben alle Anwender komplexerer Systeme gemacht, die die von ihnen festgestellte Leistung (L_{real}) mit den angegebenen Zahlen verglichen haben. Dazu zählen Computernutzer, Autofahrer und landwirtschaftliche Unternehmen gleichermaßen. Die Einflussfaktoren und die Größe der Differenz zwischen den empirischen Belegen und den Modellen gilt es zu erklären.

Determinanten der Leistungslücke

Die Determinanten der Leistungslücke lassen sich recht einfach ableiten, wenn der Begriff der Leistung genauer betrachtet wird. Leistung wird als Arbeit pro Zeit definiert und auch so gemessen. Dabei ist allerdings die geleistete Arbeit oft fest gegeben, da die Leistung des gesamten Ablaufs gesucht wird. Die benötigte Zeit ist also in diesem Ansatz die entscheidende Messgröße. Ein typisches Beispiel ist die Ermittlung der Leistung einer Maschine für die vollständige Bearbeitung eines Felds durch Messung der benötigten Zeit. Je mehr Zeit die Maschine braucht, desto geringer ist die erbrachte Leistung.

Die zentrale Frage ist also, wann und warum die benötigten Zeiten nicht immer gleich sind. Die grundlegende Antwort ist einfach: die benötigte Zeit wird länger, wenn die Maschine nicht die gesamte Zeit mit maximaler Leistung laufen kann. Die Ursachen dafür lassen sich etwas vereinfacht auf notwendige Anpassungen an sich verändernde Umweltbedingungen zurückführen (NÜSSER und STECKEL 2018). Jede Anpassung, z. B. an eine variierende Bodenfeuchte auf einem Schlag, kostet Zeit und stellt zudem die Frage, ob die Maschine in der neuen Umgebung weiterhin mit ihrer maximalen Leistung arbeiten kann.

Es sind also damit zwei Faktoren, die die Leistungslücke bestimmen:

1. Die Veränderlichkeit oder **Variabilität** der Arbeitsumgebung. Dieser Grad der Schwankung ist in der Regel der Umgebung eigen und z.B. in Prüfständen oder Reinnräumen deutlich geringer als auf dem Feld.
2. Die Fähigkeit der Maschine, sich an sich verändernde Umgebungen anzupassen. Diese **Spezifität** enthält zum einen die Zeit, die eine Anpassung erfordert, und zum anderen den Verlust, wenn eine Anpassung nicht komplett gelingt. Eine Maschine mit hoher Spezifität braucht entweder lange, um sich an neue Umgebungssituationen anzupassen und/oder schafft es nicht vollständig. Die Wahl dieses Begriffs ist durch die Transaktionskostentheorie motiviert, bei der die Fähigkeit gemessen wird, Objekte in - geänderten - Umgebungen wiederzuverwenden (WILLIAMSON 1985). Die Spezifität wird in diesem Kontext mitunter auch als Quasi-Rente bezeichnet (MONTEVERDE und TEECE 1982).

Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen Beispiele für Umgebungen bzw. Maschinen mit hoher und niedriger Variabilität bzw. Spezifität. Dort ist die Variabilität durch die Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(x)$ für einen typischen Parameter x , z.B. die Bodenfeuchte, angegeben. Analog wird die Spezifität als maximale Leistung $L(x)$ für einen bestimmten Parameterwert x angegeben.

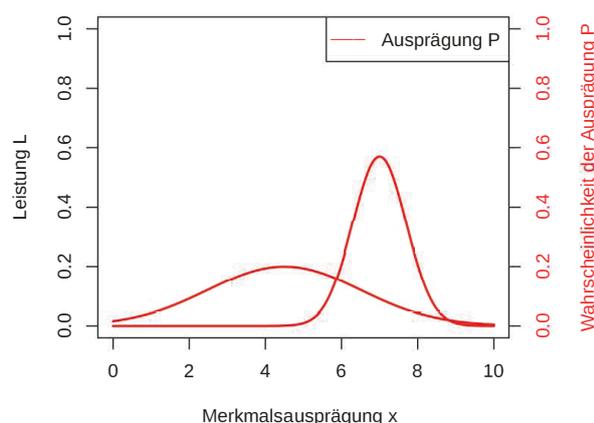


Abbildung 2: Darstellung der Variabilität der Umgebung

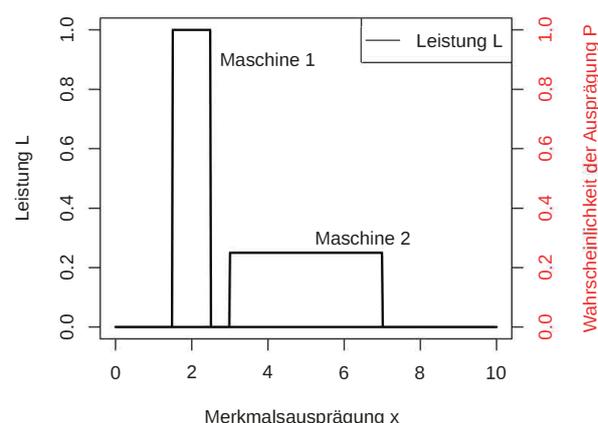


Abbildung 3: Darstellung der Spezifität zweier Maschinen

Um eine möglichst hohe Leistung zu erreichen, sind damit zwei Bedingungen zu erfüllen. Zunächst muss die Maschine für die in der realen Umgebung auftretenden Merkmalsausprägungen eine möglichst hohe Leistung erbringen. Die Kurven aus Abbildung 2 und Abbildung 3 müssen damit eine möglichst hohe Überdeckung bringen, d. h. das Integral

$$L_p = \int L(x)P(x)dx \tag{Gl. 3}$$

sollte maximal werden (Abbildung 4). Dies kann als notwendige Bedingung betrachtet werden, da ansonsten die maximale Leistung für keine Situation erreicht werden kann.

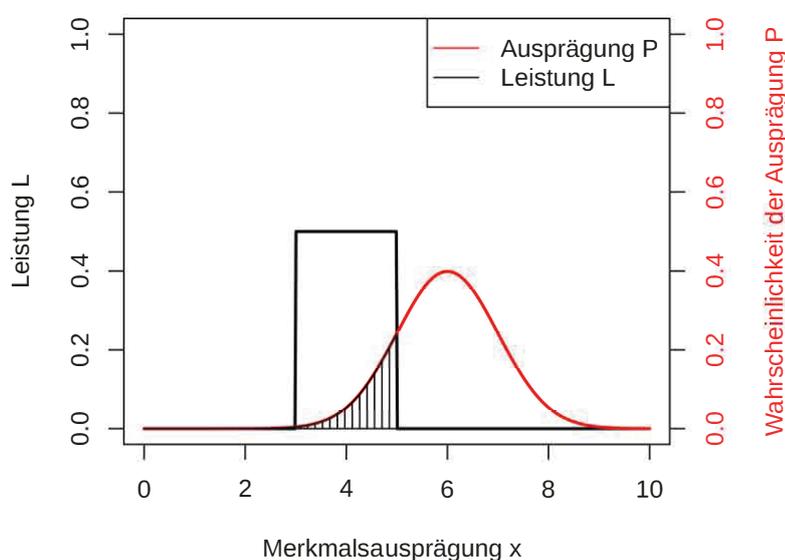


Abbildung 4: Integral beider Kurven als mittlere erreichte Leistung. Die Leistungskurve wird durch die linke vertikale Achse beschrieben, die Ausprägungsverteilung durch die rechte.

Darüber hinaus muss aber auch die Schwankung der Umgebung innerhalb eines Laufs möglichst gering sein, da sonst die Maschine einen gewissen Anteil Anpassungsarbeit leisten muss. Aus der Mittelung über alle Läufe entsteht dann eine Näherung für L_{real} . Wir betrachten im Rahmen dieses Artikels vor allem die erste Bedingung, da eine präzise Analyse der zweiten Bedingung einen größeren mathematischen Apparat erfordert.

Für die Diskussion der Bedingung, dass L_P maximal werden soll, betrachten wir aufgrund der unbekannt funktionalen Form von $P(x)$ und $L(x)$ zunächst die Extremfälle für jeweils hohe und geringe Variabilität und Spezifität. Die Extremwerte der Variabilität werden erreicht, wenn die Umgebung sehr genau kontrolliert bzw. nicht kontrollierbar ist. Die Spezifität schwankt zwischen technischen Systemen, die nur unter sehr genau definierten Bedingungen gute Leistungen erbringen können und solchen, die über einen weiten Bereich eine akzeptable oder gute Leistung zeigen. Daraus kann nicht gefolgert werden, dass eine Steigerung der Breite des Anwendungsbereichs notwendig mit einer insgesamt reduzierten maximalen Leistung einhergeht.

Es ergeben sich in starker Vereinfachung vier Kombinationen:

- Maschinen mit hoher Spezifität in Umgebungen mit hoher Variabilität
- Maschinen mit hoher Spezifität in Umgebungen mit geringer Variabilität
- Maschinen mit geringer Spezifität in Umgebungen mit hoher Variabilität
- Maschinen mit geringer Spezifität in Umgebungen mit geringer Variabilität

Diese Kombinationen sind in Abbildung 5 zeilenweise dargestellt, beginnend links oben mit einer Situation hoher Variabilität und hoher Spezifität. Diese Bilder zeigen, dass mit hoher Spezifität, d. h. schmalen Kurven $L(x)$, die Lage des Leistungsmaximums entscheidend für die mittlere erreichbare Leistung ist. Das bestmögliche Ergebnis wird erreicht, wenn Systeme in ihrer gegebenen Umgebung die maximale, d. h. installierte Leistung erbringen können. Zudem zeigen die Kurven auch, dass sehr flexible und damit unspezifische Maschinen durchaus sehr gute mittlere Leistungen erbringen können, wenn sie zudem eine gute maximale Leistung erbringen. Eine Steigerung der Maximalleistung

alleine bewirkt im Mittel der Anwendungsfälle nicht unbedingt eine für die Anwender sichtbare Verbesserung.

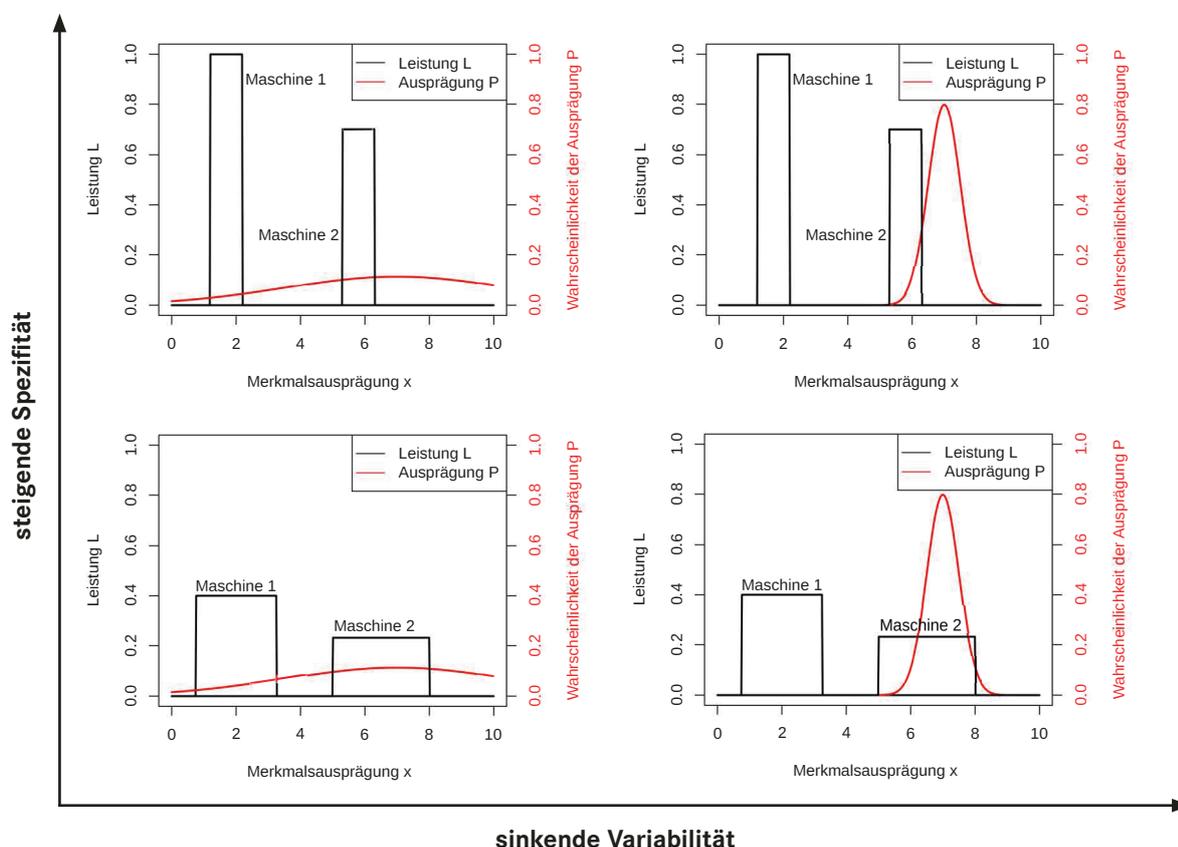


Abbildung 5: Szenarien für die Kombination von Variabilität und Spezifität. Linke Spalte: hohe Variabilität. Obere Zeile: hohe Spezifität.

Systemgrenzen für die Gestaltung von Variabilität und Spezifität bei landwirtschaftlichen Prozessen

Die Spezifität der Systeme und die Variabilität der Umgebung sind die maßgeblichen Determinanten für die realisierbare Leistung und damit für die Leistungslücke. Folglich wird das Prozessergebnis durch die Fähigkeit des technischen Systems zur Anpassung an die Umgebung und/oder die Anpassung der Umgebung an die Fähigkeiten des technischen Systems bestimmt. Um die Grenzen der Anpassung zu verdeutlichen, diskutieren wir zunächst anhand der in Abbildung 5 gezeigten Konstellationen die beiden Kernbegriffe.

Hohe Spezifität bei hoher Variabilität (oben links)

Beispiel: Selbstfahrende Pflanzenschutzspritze in Region mit heterogener Flächenstruktur
 Selbstfahrende Pflanzenschutzspritzen sind genau für einen bestimmten Anwendungsfall konstruiert, nämlich die Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln, und damit gering konfigurierbar. Diese Maschinen sind aufgrund ihrer Größe besonders für den Einsatz in Großbetrieben geeignet. Kommt eine solche Maschine in einer Region mit heterogener Flächenstruktur zu Einsatz, kann sie umso eher eine hohe Leistung erbringen, je besser die Felder auf die Anforderungen dieser Maschine

„zugeschnitten“ sind. Ein idealer Zuschnitt umfasst große, einheitliche Flächen und rechtwinklige Grenzstrukturen. Liegen diese Bedingungen nicht vor, wird die Spritze nur eine geringe mittlere Leistung zeigen. In einer Extremform kann eine solche Maschine als vollständig ungeeignet sein.

Hohe Spezifität bei niedriger Variabilität (oben rechts)

Beispiel: Selbstfahrende Pflanzenschutzspritze in Region mit homogener Flächenstruktur

Homogene Flächenstruktur bedeutet in extremer Ausprägung entweder einheitlich (ideal) große, rechteckige Felder oder einheitlich kleine Felder mit komplexen Grenzverläufen. Entspricht die Spezifität der Maschine dem engen Spektrum der Variabilität, z.B. durch eine Abstimmung der Abmessungen von Spritzwerk und Feldgröße, können selbstfahrende Pflanzenschutzspritzen eine Höchstleistung erzielen. Theoretisch betrachtet, ist sogar das Niveau der maximalen installierten Leistung erreichbar, wenn die Maschine z.B. ohne Wendemanöver mit maximaler Geschwindigkeit arbeiten kann.

Geringe Spezifität bei hoher Variabilität (unten links)

Beispiel: „Intelligenter“ Mähdrescher in hügeligem Terrain

Mähdrescher sind mit zahlreichen Assistenzsystemen ausgestattet, die eine Adaption des Verhaltens an unterschiedliche Umgebungsbedingungen ermöglichen. Zur Kompensation von Hangneigungseffekten in hügeligem Terrain sind dies beispielsweise die kontourbasierte Schneidwerksführung und die mechanische Anregung von Siebflächen zur Verteilung des Druschgutes entgegen der gemessenen Neigung. Ein mit solchen Assistenzsystemen ausgestatteter Mähdrescher beherrscht somit einen weiten Bereich von Quer- und Längsneigungen und kann bis in seine Grenzbereiche stets eine hohe Leistung realisieren. Es ist jedoch damit zu rechnen, dass diese Leistung nicht der optimalen Leistung in ebenem Terrain entspricht, weil immer wieder Zeit für die Anpassung an veränderte Neigungswinkel verbraucht wird.

Geringe Spezifität bei niedriger Variabilität (unten rechts)

Beispiel: „Intelligenter“ Mähdrescher in ebenem Terrain

Ebenes Terrain ist eine mögliche und optimale Ausprägung der Arbeitsumgebung. Weil ein „intelligenter Mähdrescher“ eine Vielzahl unterschiedlicher Ausprägungen beherrscht, kann er auch unter diesen Rahmenbedingungen eine hohe Leistung erzielen. Bei entsprechender Konstruktion ist es dabei durchaus möglich, dass diese Leistung auch im Bereich der Leistung einer hochspezifischen Maschine liegt. Auf der anderen Seite kann es Situationen geben, bei denen selbst die Konfigurierbarkeit solcher Maschinen nicht ausreicht, um unter den gegebenen Bedingungen eine akzeptable Leistung zu erbringen.

Die Diskussion dieser eher extremen Beispiele zeigt, dass die Einflussmöglichkeiten auf die beiden Kerngrößen Variabilität und Spezifität sehr unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Die Variabilität in der Umgebung wurde in klassischen industriellen Prozessen stark durch den Übergang zu geschlossenen Werkshallen und repetitiven Prozessen mit automatisierten Arbeitsschritten reduziert. Für diese wenig variablen Umgebungen konnten dann Maschinen entwickelt werden, die in diesem Parameterbereich optimale Leistungen erbrachten und dennoch vergleichsweise kostengünstig waren.

In der Landwirtschaft gehen die Ansätze des Geoen지니어ings in eine ähnliche Richtung, z. B. beim Verlegen von Drainagen, um die Bodenbefahrbarkeit zu verbessern, beim Gradern von Reisfel-

dern für gleichmäßigen Wasserstand, beim Bau von Glashäusern zur Schaffung einer kontrollierbaren Atmosphäre. Allerdings können hier nicht annähernd so scharfe Grenzen gezogen werden wie im industriellen Umfeld. Die einheitlichen Parzellengrößen, die z. B. die automatisierte Pflanzenschutzspritze erfordert, sind nur in speziellen Bereichen durchsetzbar. Folglich kann die mittlere erreichbare Leistung in diesen Fällen einer nur sehr begrenzt reduzierbaren Umgebungsvariabilität nur durch Entwicklung von anpassungsfähigen, intelligenten Landmaschinen verbessert werden. Vor diesem Hintergrund betrachtet der nächste Abschnitt Ansätze zur Verbesserung der faktisch erreichbaren Leistung.

Optimierungspotenziale

Grundsätzlich zeigen die obigen Ausführungen, dass zwei Stoßrichtungen für die Verringerung der Leistungslücke komplexer Maschinen denkbar sind:

- Reduktion der Spezifität bei möglichst gleichbleibender Bewahrung der maximalen Leistung
- Reduktion der Variabilität

Die Gestaltung der Spezifität von Maschinen erfolgt implizit im Entwicklungsprozess und wird maßgeblich von den definierten Anforderungen bestimmt. Bei der Ausprägung der Spezifität lassen sich mehrere Stufen benennen:

1. Konstruktionsbedingte Spezifität
2. Konfigurationsbedingte Spezifität
3. Prozessbedingte Spezifität

Die erste Form der Spezifität ist primär durch die Konstruktion und dann durch die werksseitig vorgegebene Konfiguration bestimmt. Diese Spezifität äußert sich z. B. in der Fähigkeit der Maschine, mit unterschiedlichen Vorsätzen zu arbeiten. Sie definiert damit im Wesentlichen den maximalen Rahmen, in dem sich im weiteren Verlauf die Maschine verändern kann und gilt damit für alle Prozesse, in denen die Maschine aktiv wird. Auf diesen Rahmen hat der Anwender keine bzw. minimale Einflussmöglichkeiten.

Die konfigurationsbedingte Spezifität lässt sich durch Veränderungen an der Maschine vor Arbeitsbeginn festlegen und ist danach für die Dauer des Prozesses als fix anzusehen, so z. B. der Anbau und die Verwendung von zusätzlichen Rapsmessern am Schneidwerk. Sie ist damit eine Spezifität pro Prozess.

Die Verwendung von Assistenzsystemen, wie z. B. das regelbasierte Einstell- und Optimierungssystem CEMOS (D.I.E. 2017), ermöglicht schließlich eine kontinuierliche Anpassung des bestmöglichen Betriebspunktes im laufenden Prozess und somit eine weitere Reduzierung der Spezifität.

Die Gestaltung der Spezifität kann nun als multikriterielles Optimierungsproblem auf jeder dieser drei Ebenen im Hinblick auf die erwartete Einsatzumgebung gesehen werden. Neben maximaler Leistung, Kosten und Bedienfähigkeit tritt die Spezifität – und damit verbunden die Variabilität der Umgebung – explizit als Designkriterium hinzu. Durch diese explizite Berücksichtigung der Spezifität ist eine systematische, quantitative Bewertung neuer Systeme möglich. Diese Betrachtung leistet somit einen neuartigen und wesentlichen Beitrag, Lasten und Pflichten zur Deckung zu bringen. Dabei ist offensichtlich, dass die Optimierung technischen, betriebswirtschaftlichen sowie gegebenenfalls organisatorischen und kognitiven Grenzen unterliegt. Beispielsweise schließen sich eine geringe Spezifität mit der verbundenen breiten Einsatzfähigkeit und zugleich eine hohe maximale Leistung nicht grundsätzlich aus, erfordern aber in der Regel erhebliche und kostenintensive maschinenbauliche

und zunehmend auch software-technische Maßnahmen. Moderne intelligente technische Systeme, die sich selbstoptimierend verhalten und z.B. im Spitzencluster „it's OWL“ untersucht werden, sind hierfür ein sehr gutes Beispiel, da sie als adaptiv, robust, vorausschauend und benutzerfreundlich charakterisiert werden (itsOWL 2018).

Die Optimierung der Spezifität ist aber nicht durch isolierte Betrachtung einer der drei genannten Ebenen allein zu erreichen. Entwicklungen neuer Mechanisierungskonzepte oder Assistenzsysteme sollten die drei genannten Stufen als Ganzes berücksichtigen. Nicht alle Aspekte der Spezifität sind in der Maschinenentwicklung angesiedelt, können aber durch diese gefördert oder behindert werden. Schlecht aufeinander abgestimmte oder abstimmbare Einzelsysteme, z.B. in logistischen Prozessen, führen zu niedriger Leistung im Gesamtsystem. Daher ist insbesondere im Bereich der prozessbedingten Spezifität das kooperative Verhalten zu betrachten. Hier unterstützen Assistenzsysteme, die durch Transparenz und Vorhersagen eine Entscheidungsunterstützung ermöglichen.

Während bei der Gestaltung der Spezifität eine Vielfalt von Engineering-Methoden zur Verfügung steht, gestaltet sich die Situation hinsichtlich der Variabilität grundsätzlich anders. Die Freiheitsgrade sind deutlich eingeschränkt. Verantwortlich dafür sind die begrenzte Zahl der wirksamen bzw. akzeptierten Methoden und die Höhe der damit verbundenen Kosten. Grundsätzlich stehen zwei Wege zur Verfügung. Dies ist einerseits die Schaffung standardisierter Umgebungsbedingungen durch Ausschaltung der natürlichen Exposition. Treibhäuser stellen eine konsequente Umsetzung dar. In Abschwächung gilt dies auch für Stallungen. Andererseits kann die Variabilität in umwelt exponierten Bereichen mit Methoden des Geo-Engineerings reduziert und in günstige Bereiche verschoben werden. Beispiele hierfür sind die Verlegung von Drainagen, der Anbau in Dämmen oder im Extremfall die künstliche Auslösung von Niederschlägen. Im Einzelfall ist eine Beeinflussung der Variabilität im Kontext der Möglichkeiten zur Gestaltung der Spezifität zu betrachten. Sicherlich spielt aber in jedem Fall die gegebene Variabilität der Umgebung bei der Entwicklung von Maschinen und der Optimierung von Prozessen eine explizite Rolle.

Fallstudie

Um die eingeführten Begriffe zu verdeutlichen, wurden rund 1.000.000 Datensätze von 56 Mähdreschern (CLAAS LEXION 770) mit der Fruchtarteneinstellung „Winterweizen“ ausgewertet. Die Datensätze wurden alle 15 Sekunden aufgenommen und beinhalteten u. a. den aktuellen Durchsatz in Tonnen pro Stunde, die Feuchte in Prozent, die Längs- und die Querneigung des Mähdreschers in Grad. Der Durchsatz wurde im Rahmen des hier betrachteten Modells als Näherung für die Leistung verwendet und die Feuchte bzw. die Neigung als Umgebungsgrößen. Zur Analyse des Einflusses dieser Größen wurde dabei immer nur eine Größe (Feuchte oder Querneigung) variiert und die jeweils anderen weitgehend konstant gehalten. Hier geben wir nur die Ergebnisse für eine Analyse des Einflusses der Kornfeuchte auf die Leistung an. Analoge Ergebnisse ergaben sich für eine Analyse der Querneigung.

Abbildung 6 zeigt analog zu Abbildung 4 und Abbildung 5, dass der Mähdrescher über den gesamten Bereich der auftretenden Feuchte eine gleichbleibende Leistung liefert. Im Bereich niedriger und hoher Feuchten ist allerdings die Anzahl der relevanten Messwerte gering, sodass die Schwankungen im Bereich größer als 20 % und kleiner als 7 % als nicht signifikant angesehen werden können. Die Bezugsgröße der Leistungsermittlung L_{inst} wurde dabei durch den Mittelwert über

alle Maschinen der jeweiligen Maximalwerte angenähert. Abbildung 6 belegt damit zum einen, dass diese Maschine eine hohe Flexibilität und damit eine geringe Spezifität besitzt, zum anderen unterstützt die Auswertung die Zahlen von Feiffer (2004). Obwohl also maschinenbaulich das Design der Maschine zur Anwendung zu passen scheint, sind beträchtliche Verluste der Leistung zu beobachten. Wie bereits oben betont, ist damit die Überdeckung der beiden Kurven $L(x)$ und $P(x)$ nur notwendig, aber nicht hinreichend für eine möglichst hohe realisierte Leistung. Schon diese erste, grobe Analyse deutet also auf die o. g. tieferliegenden Gründe dieser Leistungslücke hin, wie

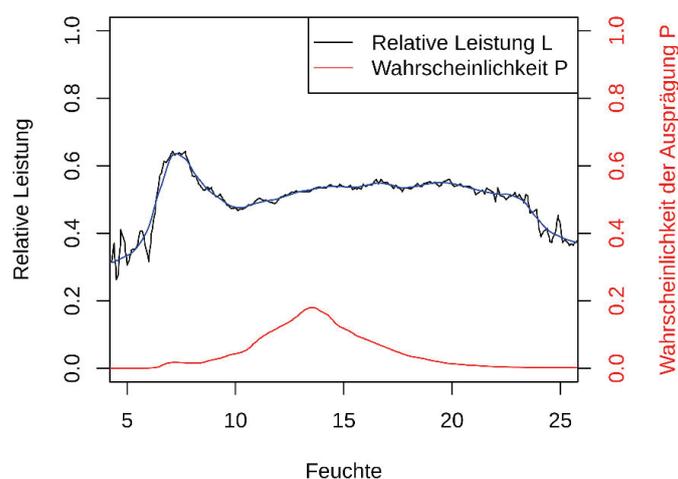


Abbildung 6: Relative Leistung in Abhängigkeit von der Kornfeuchte und Wahrscheinlichkeit für die Ausprägung

der Variabilität der Umgebung während der Ausführung.

Schlussfolgerungen

Die im Vergleich zu anderen Wirtschaftsbereichen deutlich größere Differenz zwischen installierter und realisierter Leistung motiviert zu einer Auseinandersetzung mit den Ursachen und daraus abgeleitet den Möglichkeiten zur Reduzierung. Dabei ist die Erkenntnis, dass die Spezifität der Systeme und Variabilität der Umgebung wesentliche Determinanten für die Leistung von Arbeitsmaschinen darstellen, grundsätzlich schon in einigen etablierten Ansätzen enthalten, wie die Belege der Transaktionskostentheorie (WILLIAMSON 1985) und die Analysen zur OEE (GARZA-REYES 2010) zeigen. Eine explizite Betrachtung, die messbare, aber bislang kaum systematisch betrachtete Größen, wie die Leistungslücke, dazu in Beziehung setzen, fehlte aber. So wurden Anforderungen auch in der Vergangenheit mit Blick auf die Umgebungsbedingungen berücksichtigt, jedoch meist nur implizit. Das komplexe Wechselspiel zwischen Spezifität und Variabilität wurde dabei nur teilweise erfasst.

Diese Größen werden hier erstmals in systematischer Form beschrieben und konzeptionell und formal verknüpft. Es zeigt sich, dass zwei Bedingungen vorliegen müssen, um eine möglichst geringe Leistungslücke zu erzielen: die Spezifität der Maschine muss zur Variabilität der Umgebung passen und die Variabilität pro Ausführung muss reduziert werden. In Fällen, in denen dieses nur bedingt gelingt, wie der Landwirtschaft, sind Leistungseinbußen unausweichlich. Nur noch ihre Größe kann

durch geschicktes Design der Maschinen und erhöhte Bedienbarkeit der zugehörigen Einstellmöglichkeiten reduziert werden.

Die beiden Begriffe Spezifität und Variabilität, die in diesem Artikel in den Vordergrund gestellt wurden, bieten einen einfachen Begriffsrahmen für solch eine Kategorisierung und Bewertung von Maschinenkonzepten und erlauben erste Schlussfolgerungen zu Optimierungsansätzen. So greift eine Erhöhung der maximalen Leistung einer Maschine zu kurz, wenn bei der Konzeption nicht die Variabilität der Umgebung intensiv einbezogen wird. Eine genauere mathematische Analyse bestätigt sogar das intuitiv erwartete Bild, dass leistungsstärkere Maschinen bei erhöhter Variabilität stärker an Leistung einbüßen als kleinere (NÜSSER und STECKEL 2018). Aber auch die Umkehrung ist nicht zwangsläufig ein Weg, wenn die Einsatzgebiete entsprechend gewählt werden können. Vielmehr ist der Trend zu intelligenten Systemen mit geringerer Spezifität ein vielversprechender Ansatz. Der hier entwickelte Begriffsrahmen liefert einen Beitrag zur Bewertung traditioneller und aktueller Mechanisierungs- und Produktionsverfahren, z. B. in Form von Roboterisierung oder „Pixel Farming“.

Der hier vorgestellte systematisierende Ansatz besitzt also bereits ein hohes Erklärungspotenzial, ist aber in zweierlei Richtungen weiter zu entwickeln. Zunächst steht eine genauere, mathematische Analyse des Einflusses der Schwankung auf die Leistungslücke aus. Zum anderen benötigt eine operative Anwendung die Analyse konkreter Daten. Im Rahmen dieses Artikels wurde zur Vereinfachung der Darstellung und Betonung der Allgemeingültigkeit nur eine vereinfachte Analyse vorgestellt. Auf der hier geschaffenen Grundlage ist es aber sinnvoll und notwendig, anwendungsbezogene Betrachtungen unter Nutzung von Realdaten vorzunehmen. Hierfür sind telematisch erfasste Maschinendaten und Umgebungsdaten in großer Vielfalt verfügbar.

Der Beitrag beschränkt sich zudem auf die Betrachtung einzelner (Teil-)Prozesse, hier Spritzen und Dreschen. Der Erfolg eines Prozesses wird nur selten durch ein Einzelsystem, sondern durch das erfolgreiche Zusammenspiel der voneinander abhängigen Systeme, z. B. in Ernteketten, bestimmt. Der in diesem Beitrag entwickelte Ansatz sollte unter dem Gesichtspunkt kooperativer Verhaltensweisen weiterentwickelt werden und könnte dann die Spezifität und Variabilität ganzer Prozesse betrachten und damit zu deren Optimierung beitragen.

Literatur

- Bolding, M.C. (2008): Increasing Forestry Machine Utilization. Sawmill & Woodlot, pp. 22-27
- D.I.E. e.V. (2017): Autonomes Dreschwerk von CLAAS. Dieselmedaille Zukunftsidee. <https://dieselmedaille-zukunftsidee.de/top-technologien/autonomes-dreschwerk-von-claas/>, Zugriff am 10.4.2019
- Feiffer, A. (2004): Großversuch mit dem CR 980: Einfluss des YARA N-Sensors auf die Mähdrescherleistung. Zentrum für Mechanisierung und Technologie, Sondershausen
- Garza-Reyes, J.A. et al. (2010): Overall equipment effectiveness (OEE) and process capability (PC) measures. International Journal of Quality & Reliability Management 27(1), pp. 48-62
- It'sOWL (2018): Intelligente technische Systeme OstWestfalenLippe. <https://www.its-owl.de/home/>, Zugriff am 14.12.2018
- Leachman, R.C. (1997): Closed Loop measurement of equipment efficiency and equipment capacity. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing 10(1), pp. 84-97
- Lee, M.D.; Shahidul, M.I. (2013): An approach to optimize machinery capacity utilization for sustainable manufacturing performance. Journal of Manufacturing, Operations Research and Sustainability 1(2), pp. 21-32

- May, C.; Koch, A. (2008): Overall equipment effectiveness (oeo) - Werkzeug zur Produktivitätssteigerung. Zeitschrift der Unternehmensberatung (ZuB) 6, pp. 245-250
- Monteverde, K.; Teece, D.J. (1982): Appropriable rents and quasi-vertical integration. The Journal of Law and Economics 25(2), pp. 321-328
- Nakajima, S. (1988): Introduction to TPM: total productive maintenance. Productivity Press
- Nüßer, W.; Steckel, T. (2018): Performance Gaps of Machines. Springer Verlag
- Rudolph, M. (1988): Energy savings in the manufacture of crankshafts – an example of integrated analysis based on detailed measurements. In: Energy Efficiency in Industry, Ed. J. Sichrhis, pp. 28-36
- Williamson, O.E. (1985): The Economic Institutions of Capitalism. Macmillan, New York
- YU, Ch.-M.; Kuo, Ch.-J.; Chiu, Ch.-L.; Wen, W.-Ch.; Zhang, M. (2018): Unveil the Black Box for Performance Efficiency of OEE for Semiconductor Wafer Fabrication. In: 2018 International Symposium on Semiconductor Manufacturing (ISSM). IEEE, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8651146>, Zugriff am 23.11.2018

Autoren

Dr. sc. agr. Thilo Steckel, Advanced Engineering, CLAAS E-Systems GmbH, Sommerkämpfen 11, 49201 Dissen a.T.W., E-Mail: thilo.steckel@claas.com

Prof. Dr. rer. nat. Wilhelm Nüßer, Lehrstuhl für Informatik, FHDW Paderborn, Fürstenallee 5, 33102 Paderborn