

Thomas NEUBAUER<sup>1</sup>, Alexander BAUER, Johannes HEURIX,  
Michael IWERSEN, Kevin MALLINGER, Ahmad M. MANSCHADI,  
Warren PURCELL & Andreas RAUBER (Wien)

# Nachhaltige Digitale Zwillinge in der Landwirtschaft

## Zusammenfassung

Die Digitalisierung vollzieht sich auch in der Landwirtschaft in rasanter Geschwindigkeit. Die erheblichen Risiken bei der Anwendung von Lösungen, die in ihren Grundlagen und Auswirkungen oft nicht vollständig verstanden werden, bergen jedoch ein hohes Bedrohungspotenzial für die Resilienz und Nachhaltigkeit der Landwirtschaft. Dieser Artikel zeigt den Einsatz von Digitalen Zwillingen anhand von zwei ausgewählten Versuchsfarmen in Österreich. Das Projekt verfolgt das Ziel, durch den Aufbau modernster Versuchsfarmen als „Digitale Zwillinge“ eine zukunftsweisende Versuchsinfrastruktur für interdisziplinäre Forschung und Lehre auf internationalem Niveau zu etablieren. Es beinhaltet zudem ein Framework zur Integration von Anforderungen gemäß verschiedener Kriterien, um ein nachhaltiges Design von Digitalen Zwillingen in der Landwirtschaft zu ermöglichen.

## Schlüsselwörter

Digitale Zwillinge, Landwirtschaft, Künstliche Intelligenz, Nachhaltigkeit, Resilienz

---

1 E-Mail: [thomas.neubauer@tuwien.ac.at](mailto:thomas.neubauer@tuwien.ac.at)



Namensnennung 4.0 International

## Sustainable digital twins in agriculture

### Abstract

Digitisation in agriculture is taking place at a rapid pace. The significant risks associated with the application of solutions whose fundamentals and implications are often not fully understood pose a high potential threat to the resilience and sustainability of agriculture. This paper demonstrates the use of the concept of digital twins on two selected experimental farms in Austria. The project aims to establish a future-oriented experimental structure for interdisciplinary research and teaching at an international level by setting up state-of-the-art experimental farms as digital twins. The project thereby offers a framework for the integration of multi-criteria requirements to enable the sustainable design of digital twins in agriculture.

### Keywords

digital twins, agriculture, artificial intelligence, sustainability, resilience

## 1 Einleitung

Der Digitale Zwilling (DZ) ist eine in Echtzeit synchronisierte virtuelle Darstellung eines Produkts, eines Prozesses oder einer Umgebung. Die Grundideen, die später zum Digitalen Zwilling werden sollten, wurden erstmals 2002 von Michael Grieves als Konzept der virtuellen Replikate in der Luftfahrt geprägt. GRIEVES & VICKERS (2017) definieren DZ als ein virtuelles, digitales Äquivalent (Repräsentation) eines physischen Objekts, Prozesses oder Systems, das das aktuelle und/oder zukünftige Verhalten des physischen Äquivalents wiedergibt. Später wurde eine genauere Definition etabliert, die den DZ als eine Repräsentation eines aktiven, einzigartigen Produkts beschreibt, das ein reales Gerät, ein Objekt, eine Maschine, eine Dienstleistung, ein immaterieller Vermögenswert oder ein System sein kann, das aus einem Produkt und seinen zugehörigen Dienstleistungen besteht (STARK & DAMERAU, 2019).

Obwohl diese erweiterte Definition viele Vorteile hat, ist ein Punkt, der zunehmend Anlass zur Sorge gibt, die Schwierigkeit, damit digitale Zwillinge genau von nicht-digitalen Zwillingen zu unterscheiden, z. B. die falsche Kennzeichnung von allgemeinen Computermodellen als Digitale Zwillinge (FULLER, FAN, DAY & BARLOW, 2020). Ein weiterer Punkt der Unklarheit ist der Grad der Wiedergabetreue, der von einem Digitalen Zwilling erreicht werden muss, damit er als genaue Darstellung des modellierten Objekts gelten kann. Als nützliche Metrik zur Einschränkung des breiten Anwendungsbereichs der meisten Definitionen etablieren KRITZINGER, KARNER, TRAAR, HENJES & SIHN (2018) ein Klassifizierungskriterium, das auf dem Datenintegrationsgrad basiert, der zwischen dem physischen Produkt und seiner virtuellen Darstellung erreicht werden kann. Dabei werden drei Integrationsebenen unterschieden: Erstens das Digitale Modell (DM), zweitens der Digitale Schatten (DS) und drittens der Digitale Zwilling (DZ). Ein DM ist dabei eine digitale Darstellung ohne automatischen Datenaustausch zwischen der Entität und dem virtuellen Modell. Dies ist die niedrigste Stufe der Integration, die erreicht werden kann. Sie kann mit dem Prototyp eines digitalen Zwillings verglichen werden. Ein DS hingegen ist eine digitale Darstellung mit automatisiertem Informationsfluss in eine Richtung. Diese Informationen fließen von der Entität in die virtuelle Darstellung, d. h. eine Änderung der Entität spiegelt sich in der virtuellen Darstellung wider. Dies ist vergleichbar mit einer Instanz eines DZ. Ein DZ ist sodann eine digitale Darstellung mit automatischem bidirektionalen Informationsfluss. Der digitale Zwilling hat wie ein digitaler Schatten eine virtuelle Repräsentation, die alle Änderungen des Zustands der physischen Einheit widerspiegelt. Der Unterschied besteht darin, dass der Digitale Zwilling auch den Zustand der physischen Einheit beeinflussen kann, die Mittel sind jedoch abhängig vom Kontext und der Art des Objekts. PURCELL & NEUBAUER (2023) führen eine Kategorisierung nach Anwendungsfällen in der Landwirtschaft durch und zeigen anhand von aktuellen Publikationen, welchen Datenintegrationsgrad die zugrunde liegenden Modelle aufweisen. Die aktuelle Literatur zum Themenbereich DZ zeigt, dass die derzeitigen Fortschritte und die Verbreitung des Konzepts vor allem aus Durchbrüchen in den Bereichen des Internets der Dinge und der Künstlichen Intelligenz resultieren (vgl. FAROOQ, SOHAIL, ABID & RASHEED, 2022). Die erweiterte Datenverfügbarkeit, einschließlich strukturierter und unstrukturierter Daten, hat die notwendigen technologischen Voraussetzungen für die (nahezu) Echtzeit-Replikation zwischen den Modellen geschaffen. SMITH (2018) hat festgestellt, dass die

Einführung von Künstlicher Intelligenz (KI) in der Landwirtschaft zu einer natürlichen Übernahme von Technologien wie dem DZ führen wird. Das stetige Wachstum der Forschung zu Themen wie Cyber-Physical Systems (CPS), Internet der Dinge und KI, gekoppelt mit dem zunehmenden Umfang der Arbeiten über den Digitalen Zwilling untermauern diese Argumentation (vgl. TAO, QI, WANG & NEE, 2019). Die meisten landwirtschaftlichen Anwendungen sind jedoch noch nicht über den Labormaßstab hinausgekommen und konzentrieren sich in erster Linie auf die Integration von Computerintelligenz und Fernerkundungsgeräten für spezifische Systemoptimierung und informierte Managementaufgaben. TEBALDI, VIGNALI & BOTTANI (2021) zeigen in ihrer Literaturanalyse den Einsatz von DZ entlang der Nahrungsmittelkette, während VERDOUW, TEKINERDOGAN, BEULENS & WOLFERT (2021), PURCELL & NEUBAUER (2023), PURCELL, NEUBAUER & MALLINGER (2023) die Literaturanalyse auf den Bereich von Smart Farming legen. Die Konzeption von DZ in Teilbereichen der Landwirtschaft behandeln GARCÍA, AGUILAR, TORO, PINTO & RODRÍGUEZ (2020) sowie MALLINGER, PURCELL & NEUBAUER (2022), die den Fokus ihrer Literaturanalyse auf den Bereich von Präzisionstierhaltung legen.

## 2 Nutzen und Risiken

Die erweiterte Verfügbarkeit von Daten, die durch DZ bereitgestellt werden, schafft neue Bewertungsmöglichkeiten, um das Monitoring des Lebenszyklus oder die Verfolgung der Lieferkette zu ermöglichen. Auf diese Weise werden mehr Möglichkeiten geschaffen, um Korrekturmaßnahmen einzuleiten und um die sozialen und ökologischen Zielsetzungen wiederherstellen und verbessern zu können. Digitale Zwillinge unterstützen deren Stakeholder bei der effizienten Nutzung verfügbarer Ressourcen und Infrastrukturen.

So können Landwirte beispielsweise mithilfe digitaler Zwillinge die Menge und Häufigkeit der Bewässerung ihrer Felder optimieren, den Wasserverbrauch senken und die Ernteerträge steigern. Digitale Zwillinge können zur Optimierung des Düngemitelesinsatzes eingesetzt werden, um eine Verringerung der Nährstoffauswaschung und eine Verbesserung der Bodenqualität und eine höhere Nutzungseffizienz der Nährstoffe zu erzielen. Sie können auch verwendet werden, um die optimale

Anbaufläche für bestimmte Kulturen zu bestimmen und eine optimale Fruchtfolgeplanung im Hinblick auf verschiedene Ziele (z. B. Ertrag, Humusaufbau, Biodiversität, Bodenbedeckung usw.) zu ermöglichen. Digitale Zwillinge ermöglichen das Management von Tierhaltungsbetrieben zu optimieren, den Einsatz von Tierarzneimitteln zu verringern und gleichzeitig die Gesundheit und das Wohlbefinden der Tiere zu verbessern (Raba, Tordecilla, Copado, Juan, Mount., 2022; Jo, Park, Kim, 2018). Des Weiteren, können Digitale Zwillinge dazu verwendet werden, um das Wachstum und die Gesundheit von Pflanzen zu überwachen, sodass Krankheiten und Schädlinge frühzeitig erkannt werden können (Van Evert, Berghuijs, Hoving, De Wit, Been, 2021).

Viele Stakeholder gehen davon aus, dass Digitale Zwillinge Landwirten helfen können, ihre Betriebe zu automatisieren und besser zu verwalten, indem Echtzeit-Daten analysiert werden, um Trends und Muster zu identifizieren. Die Digitalisierung kann es Landwirten ermöglichen, ihre Betriebe mit weniger Personal und Ressourcen zu bewirtschaften. Auf diese Weise werden sie in der Lage sein, ihre Produkte zu niedrigeren Preisen zu erzeugen und ihre Wettbewerbsfähigkeit zu verbessern.

Eine vielfach verbreitete Konsequenz besteht darin, „alles“ zu digitalisieren. Während diese Vorgangsweise zweifelsfrei der Zielsetzung dient, Digitale Zwillinge zu definieren, fehlen in der Diskussion deren Konsequenzen in der Praxis. Die Mehrheit der Projekte und Publikationen vernachlässigt die Betrachtung der sozialen, ökonomischen, (sicherheits-)technischen und ökologischen Auswirkungen. Ein Blick in andere Bereiche/Anwendungsfelder, in denen die Digitalisierungshypes bereits früher stattgefunden haben, geben einen Ausblick auf die Konsequenzen der Digitalisierung in der Landwirtschaft. Die letzten 25 Jahre der Digitalisierung haben gezeigt, dass die Herausforderungen nicht in der technischen Realisierbarkeit der Visionen bestanden, sondern darin, mit den resultierenden Begleiterscheinungen umzugehen (vgl. ALTER, 2017; CRAMER, 2017).

Digitale Zwillinge in der Landwirtschaft und deren Begleittechnologien legen die Basis, um vollautonome Landwirtschaften etablieren und betreiben zu können. Die größte Auswirkung wird diese Entwicklung auf das Berufsbild der Landwirte haben. Derzeit verfügen über 70% der Landwirte in der EU lediglich über praktische landwirtschaftliche Kompetenzen. Eine mögliche Konsequenz der Digitalisierung besteht darin, dass Landwirte ihre Kompetenzen, insbesondere in Bezug auf technologische, umweltbezogene und Management-assoziierte Bereiche steigern

können. Die Entwicklungen in Bezug auf die Digitalisierung in der Vergangenheit deuten vielmehr darauf hin, dass kleinbäuerliche und familiengeprägte Betriebsstrukturen in dieser Ausbaustufe kaum mehr existieren (vgl. INGRAM & MAYE, 2020; CHRISTIAENSEN, RUTLEDGE & TAYLOR, 2020).

Technologische Entwicklungen haben grundsätzlich das Potenzial, die Autonomie der Benutzer zu steigern, beispielsweise indem die Entscheidungsfindung unterstützt und die finanzielle Unabhängigkeit gefördert wird. Eine Voraussetzung dafür ist, dass diese Technologien kostengünstig oder frei verfügbar sind und ohne erheblichen Aufwand verstanden und eingesetzt werden können. Sind diese Voraussetzungen nicht gegeben, kann die Digitalisierung zu einer Verbreiterung des Informations-Gaps zwischen ökonomisch besser situierten landwirtschaftlichen Betrieben und anderen Betrieben führen. Zudem treibt sie einen Strukturwandel voran, der mit einer zunehmenden Monopolisierung einhergeht (MALLINGER, PURCELL & NEUBAUER, 2022). Die davon betroffenen Bereiche sind folgende:

- Technologie: Abhängigkeit von Technologien und Technik und deren Anbietern (Lock-in-Effekt), wodurch Landwirte zunehmend die Kontrolle über ihre Betriebe verlieren könnten. Auf der anderen Seite könnten viele Technologien zu teuer sein, um sie für alle Landwirte erschwinglich zu machen.
- Informationen/Daten: Technologien beschleunigen den Wegfall des landwirtschaftlichen Fachwissens als Alleinstellungsmerkmal der Landwirte, indem es beispielsweise durch Künstliche Intelligenz ersetzt wird. Umfassende Datensammlungen können zu Sicherheits- und Datenschutzrisiken sowie zu zusätzlicher Überwachung führen.
- Ressourcen: Landwirtschaftlicher Grund wird immer mehr als Investment gesehen und in großen Dimensionen von einzelnen Akteuren aufgekauft.
- Betriebsmittel: Saatgut und Pflanzenschutzmittel kommen aus den Händen einzelner Anbieter.

Bisher war vor allem im Bereich der Betriebsmittel eine starke Monopolisierung zu beobachten. In den letzten Jahren ist diese Entwicklung zunehmend bei landwirtschaftlichen Flächen zu beobachten, die von Konzernen als Investment gekauft werden (Landgrabbing). Technologien können zu einer Monopolisierung der Land-

wirtschaft führen, wenn nur finanzstarke Akteure in der Lage sind, die Technologie zu entwickeln und zu implementieren. In kapitalintensiven Bereichen der Landwirtschaft, wie dem Gemüsebau, Indoor-Farming, Aquaponik etc., ist diese Entwicklung bereits deutlich sichtbar.

Der weit verbreitete Einsatz von Informationstechnologie (z. B., Künstliche Intelligenz, Sensortechnologien etc.) in der Landwirtschaft schafft eine neue Dimension der Abhängigkeit der Nutzer von den Technologien und deren Produzenten und bedroht die Resilienz der landwirtschaftlichen Systeme. Die Zentralisierung von Fachwissen am Standort des Anbieters ermöglicht ein kontinuierliches Geschäftsmodell, das auf der Wartung und Aufrüstung der eingesetzten Systeme beruht. Auf der anderen Seite erhöht dies die Abhängigkeit der Landwirte von den Unternehmen als einzigen Wissenslieferanten. Der eingeschränkte Zugang der Landwirte zu Wissen führt zu einer geringen Wartbarkeit und Anpassung neuartiger Technologien und letztlich zu einer geringeren Fähigkeit, Entscheidungsprozesse beurteilen zu können. Dies wiederum senkt entweder das Vertrauen oder führt zu einem Übervertrauen in die Entscheidungsergebnisse sowie zu Einschränkungen bei der wirtschaftlichen Nutzung der Technologie. Weiters wirft der Einsatz viele ungeklärte Fragen zu Datensicherheit, Datenschutz, Lebensmittelsicherheit und Haftung auf. Ungeklärte rechtliche, ethische und technische Fragen im Zusammenhang mit Dateneigentum und -missbrauch, der Verwendung von Daten für die Überwachung und Kontrolle durch Regulierungsbehörden und der Verantwortung für wirtschaftliche und ökologische Folgen werden sich in den kommenden Jahren grundlegend auf die Branche auswirken. Neben unbeabsichtigten Sicherheitsvorfällen muss eine starke Vernetzung von Systemen immer vor dem Hintergrund gezielter Angriffe betrachtet werden. Lebensmittelproduktion und Landwirtschaft werden als kritische Infrastrukturen eingestuft und können Ziele von hybriden Konflikten oder Hackerangriffen werden. Werden Technologien, von denen die Landwirtschaft abhängt, angegriffen, sind unter Umständen nicht nur einzelne Betriebe, sondern die Unabhängigkeit und Selbstversorgung eines ganzen Landes gefährdet.

Viele Technologien befinden sich noch im Anfangsstadium ihrer Entwicklung, wobei der langfristige Nutzen und das Missbrauchspotenzial unbekannt oder für den Einsatz in sensiblen Bereichen wie der Landwirtschaft nicht ausreichend erforscht sind. Unternehmen neigen in der Regel dazu, die Einführung von Technologien zu forcieren, obwohl die vielfältigen Auswirkungen noch nicht vollständig verstanden

werden. Die rasche Entwicklung und Einführung digitaler Technologien in der Landwirtschaft kann daher durchaus zur Verbreitung von Risiken verschiedener Art beitragen (vgl. PAPERNOT, MCDANIEL, JHA, FREDRIKSON & CELIK, 2016). Dies kann die Spannungen über den Datenschutz und die gemeinsame Nutzung dieser Daten durch die Landwirte verschärfen. Solche Spannungen untergraben die Resilienz, indem sie Misstrauen schaffen und die Anpassungsfähigkeit der einzelnen Landwirte verringern. Beispielsweise werden derzeit in vielen Bereichen Methoden der Künstlichen Intelligenz eingesetzt, oft ohne entsprechende Kenntnisse darüber, wie die Methoden funktionieren und wie sie manipuliert werden können. Erklärbare Künstliche Intelligenz (Explainable Artificial Intelligence, XAI) ist ein Ansatz, der sich als wirksam erweisen könnte, um Black-Box-Modelle zu überwinden, indem die Entscheidungsprozess solcher Modelle nachvollziehbar gemacht werden (siehe HOXHALLARI, PURCELL & NEUBAUER, 2022 für eine Literaturanalyse des Potenzials von XAI mit dem Schwerpunkt auf Precision Livestock Farming).

### **3 Das Projekt digital.twin.farm**

Das Projekt digital.twin.farm zeigt die technischen Möglichkeiten von DZ bei deren Umsetzung an den Versuchswirtschaften der Veterinärmedizinischen Universität Wien in Kremesberg und der Universität für Bodenkultur Wien in Groß Enzersdorf auf. Es definiert ein Lebenszyklusmodells für Digitale Zwillinge in der Landwirtschaft und erweitert dessen Systemgrenzen, um soziale (ethische, rechtliche) und ökologische Faktoren zu berücksichtigen. Die Definition typischer landwirtschaftlicher Prozesse bildet die Ausgangsbasis für die Modellierung der Digitalen Zwillinge. Im Rahmen des Projekts befassen sich die Forscher:innen am Lehr- und Versuchsbetrieb (VetFarm) der Veterinärmedizinischen Universität unter anderem mit den Auswirkungen von Hitzestress auf die Tiergesundheit, das Tierverhalten sowie auf das Wohlergehen von Kühen und Kälbern. Die generierten Daten tragen dazu bei, die Auswirkungen der globalen Erwärmung sowie von verschiedenen Gegenmaßnahmen auf die Tiergesundheit, das Wohlbefinden und die Produktivität der Nutztierbestände simulieren zu können. Der jeweilige Nutzen der Gegenmaßnahmen kann somit für verschiedene (Standort-)Bedingungen getestet und evaluiert werden. Hierbei wird die Automatisierung der Prozessabläufe von Umwelteinflüssen, Gegenmaßnahmen und Tiergesundheit angestrebt, wobei neben Aspekten des

Tierwohls auch ökonomische Gesichtspunkte (z. B. Energie- und Wasserbedarf zur Kühlung, Veränderung der tierischen Produktion) berücksichtigt werden. An der Universität für Bodenkultur Wien befassen sich Forscher:innen mit der Erhebung von Daten auf Ackerflächen. Diese erhobenen Daten bilden die Grundlage für die Abbildung der landwirtschaftlichen Tätigkeiten ausgehend von der Erhebung des Ressourceneinsatzes über die detaillierte Erhebung der Bewirtschaftung bis hin zu den biologischen Abläufen auf dem Feld. Die erhobenen Daten können vielseitig verwendet werden. So können administrative Prozesse eines Versuchsbetriebs vereinfacht und der Einsatz von Ressourcen entsprechend dokumentiert werden. In der Hochschullehre können beispielsweise Digitale Zwillinge von Versuchspartzen von Student:innen verwendet werden, um landwirtschaftliche Praxis und Auswirkungen von Maßnahmen anhand von Veränderungen in den Daten begreifbar zu machen.

### 3.1 Das Lebenszyklusmodell für Digitale Zwillinge in der Landwirtschaft

Der Lebenszyklus der Daten im Rahmen eines digitalen Zwillings ist ein sich wiederholender Prozess. Damit wird die kontinuierliche Verbesserung des digitalen Zwillings und damit des zugrundeliegenden Prozesses ermöglicht. Wir definieren das Basismodell mit folgenden Phasen (Abbildung 1):

- 1. Erfassung der Daten:** In dieser Phase werden die Daten gesammelt, die für den digitalen Zwilling benötigt werden. Diese Daten können aus einer Vielzahl von Quellen am Betrieb stammen, wie z. B. Sensoren, Maschinen, Wetterstationen, Drohnen, Menschen etc.
- 2. Speicherung der Daten:** Die Daten werden vor Ort, beispielsweise in temporären Datenbanken oder in Farm-Management-Systemen, (zwischen-)gespeichert.
- 3. Übertragung der Daten:** Anschließend erfolgt die Übertragung der Daten in den Digitalen Zwilling.
- 4. Integration der Daten:** In dieser Phase werden die gesammelten Daten in das definierte Modell des DZ übergeführt. Dies kann die Bereinigung, Transformation und Standardisierung der Daten umfassen. Ebenso erfolgt die Zu-

sammenführung mit Daten aus anderen (offenen) Systemen, z. B. GIS-Daten, Satellitendaten, Bodendaten etc. und die Persistierung, z. B. in Datenbanken oder Data Warehouses.

- 5. Variation:** Im Wechselspiel mit Simulationsmethoden (z. B. unter Verwendung von Künstlicher Intelligenz, Data/Predictive Analytics, Decision Support Systemen, What-if-Analysen, Sensitivitätsanalyse) erfolgt die Variation der relevanten Modellparameter. Dies kann in beliebig vielen Zyklen entweder automatisiert oder manuell durch Fachexpert:innen erfolgen.
- 6. Simulation der Eigenschaften:** Die Simulation erfolgt im Wechselspiel mit der Variation, in welcher die Modelleigenschaften an den jeweiligen Anwendungsfall optimiert werden. In dieser Phase werden die Modellparameter festgelegt und die Daten (in Echtzeit) verarbeitet.
- 7. Auswertung der Simulationen:** In dieser Phase werden die Erkenntnisse aus der Datenanalyse visualisiert und analysiert, um mit dem DZ zu kommunizieren, diesen zu verwalten und zu optimieren. Diese Erkenntnisse können verwendet werden, um den Digitalen Zwilling zu verbessern, Entscheidungen zu treffen oder Probleme zu lösen.
- 8. Übertragung der optimierten Parameter:** Hier erfolgt die Übertragung der optimierten Parameter in die reale Umgebung.
- 9. Übernahme der Parameter:** In dieser Phase werden die Parameter in die betroffenen (Software-)Systeme übernommen (z. B. Bewässerungsmenge, Düngemenge, Futtermenge etc.).
- 10. Betrieb der Landwirtschaft:** Die Parameter dienen als Basis für die Umsetzung der Prozesse im landwirtschaftlichen Betrieb. Die Umsetzung der Prozesse erfolgt, z. B. unter Verwendung von Steuerungssystemen, Maschinen, Robotik etc.

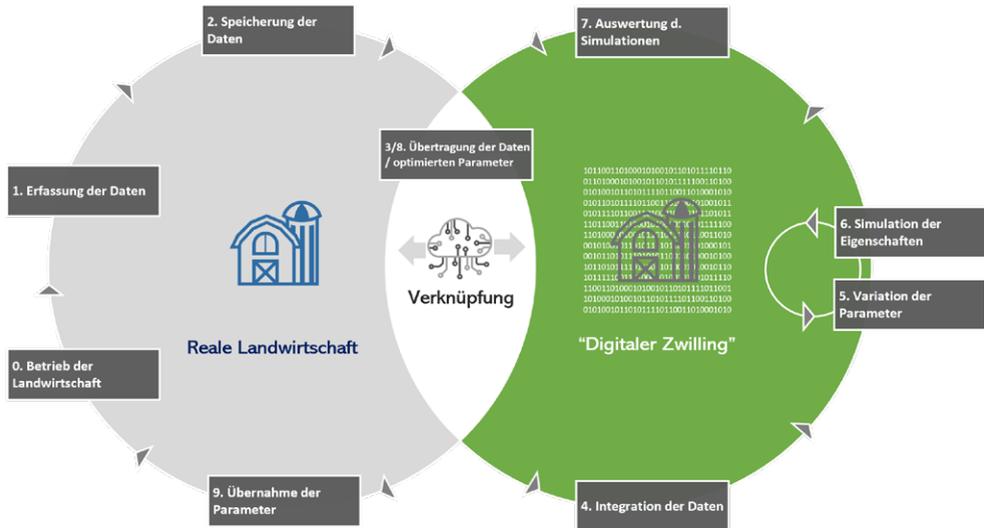


Abb. 1: Lebenszyklusmodell von Digitalen Zwillingen in der Landwirtschaft

In Abhängigkeit von den zugrundeliegenden Prozessen, Methoden und Technologien können einzelne Schritte des Modells weggelassen werden. Darüber hinaus gibt das Modell keine Vorgaben darüber, in welcher Umgebung der Digitale Zwillinge betrieben wird. Er kann beispielsweise vollintegriert in einem Farm-Management-System betrieben werden. Es können jedoch auch stark verteilte Anwendungen angestrebt werden, falls beispielsweise vertrauliche Modelle, die nur auf bestimmten Severn zur Verfügung stehen, eingebunden werden sollen.

### **3.2 Soziale, technologische und ökologische Grenzen – Der Nachhaltige Digitale Zwilling**

Digitale Zwillinge nutzen eine breite Palette von Technologien, um eine realitätsnahe virtuelle Replikation von Entitäten mit komplexen Lebenszyklen zu replizieren und zu verwalten. Dies erfolgt durch die Konsolidierung großer Mengen von Echtzeitdaten aus verteilten Quellen unter Einbindung von simulationsgestützten Erkenntnissen und Feedback-Mechanismen (JONES et al., 2020). Digitale Zwillinge im landwirtschaftlichen Bereich versuchen biophysikalische Gegebenheiten und Abhängigkeiten zu optimieren. Der Grad der Präzision und des Erfolgs beim Erreichen dieser Zielsetzungen ist direkt und indirekt mit ökologischen und sozialen Rückkopplungen sowie mit der Fähigkeit des Designs des DZ, diese zu verarbeiten und darzustellen verbunden. Die Definition von DZ ohne Berücksichtigung der verflochtenen Rückkopplungsmechanismen wird zu Modellen führen, denen es an Realitätstreue, Flexibilität und Verarbeitungskapazitäten fehlt, um mit Unsicherheiten umgehen und komplexe Zusammenhänge der realen Welt nachhaltig managen zu können.

Ein Nachhaltiger Digitaler Zwilling integriert beim Design, der Umsetzung und dem Betrieb nicht nur technologische und ökonomische Faktoren, sondern auch die systemischen Effekte von ökologischen und sozialen (ethischen) Einflussfaktoren (siehe Abbildung 2). Besonders in der Landwirtschaft ist diese erweiterte Betrachtung von essenzieller Bedeutung, da biophysikalische Ressourcen und Lebewesen die Grundlage (Boden, Wasser) und das Ergebnis (Pflanzen, Tiere) der Modellierung darstellen. Der DZ steht im Zentrum von verschiedenen Abhängigkeiten, mit dem Ziel, individuelle Rückmeldungen und Anforderungen zu vermitteln (rechtlich, ökologisch, technisch, sozial, ethisch etc.). Weiters soll im Design darauf geachtet werden, dass sozial-demografische Mechanismen berücksichtigt werden, um existierende Ungleichheiten zwischen Geschlechtern, Völkern, Unternehmensgrößen nicht zu verstärken. KI-Modelle, die auf verzerrten Daten trainiert wurden, können bestehende Ungleichheiten verstärken. Zum Beispiel wenn Stichproben sich nur auf bestimmte Regionen beziehen und die Daten verschiedene demografische Merkmale ausschließen (Ausschlussverzerrung) oder sich zu sehr auf Kulturen mit hohem wirtschaftlichem Wert konzentrieren (Auswahlverzerrung). Solche Verzerrungen schränken die Fähigkeit der Landwirte ein, aus den verallgemeinerten Vorschlägen der KI Maßnahmen abzuleiten, und können zu einer Benachteiligung von Gebie-

ten oder Kulturen führen, die wirtschaftlich weniger interessant sind. Aufgrund der daraus resultierenden Abhängigkeiten und Wechselwirkungen wird die Definition der internen und externen Grenzen eines Digitalen Zwillings in der Landwirtschaft zu einer komplexen, interdisziplinären Aufgabe. Zudem bauen DZ auf den Fähigkeiten und Schwächen bestehender Technologien auf, wodurch ihr hyper-vernetztes Design nicht nur diese systemischen Verbindungen, sondern auch Schwachstellen übernimmt und verstärkt (vgl. FULLER, FAN, DAY & BARLOW, 2020).

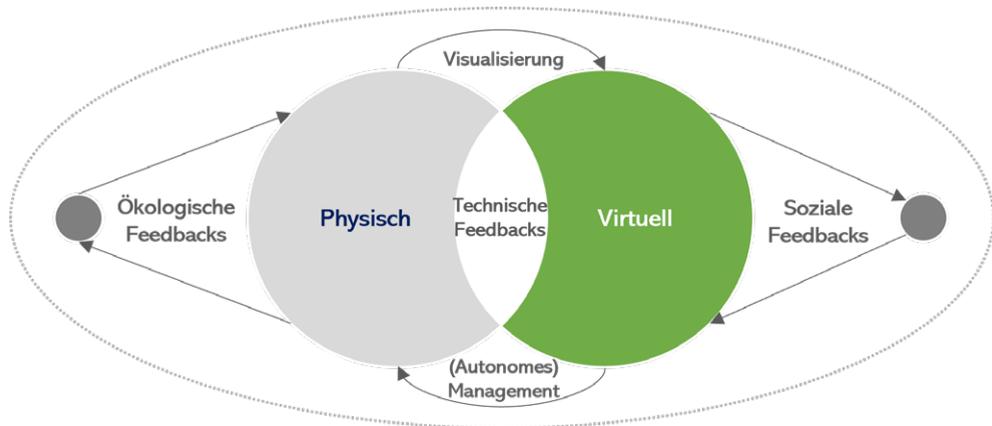


Abb. 2: Erweiterte Systemgrenzen des Nachhaltigen Digitalen Zwillings

Wenn die Konsequenzen der starken Vernetzungen in der frühen Entwurfsphase nicht angemessen berücksichtigt werden, können digitale Zwillinge Hindernisse bei der Einführung von Technologien verstärken wie z. B. mangelndes Vertrauen und mangelnde Benutzerfreundlichkeit, die Angst vor einer geringen Investitionsrendite, Fragen der Interoperabilität, Datenschutz und Sicherheit sowie Bedenken hinsichtlich Komplexität und externer Abhängigkeiten. Um ein Gleichgewicht zwischen qualitativen Merkmalen wie Benutzerfreundlichkeit, Wartungsfreundlichkeit und Einhaltung von Rechtsvorschriften zu schaffen, müssen soziale Abhängigkeiten und Interaktionen sorgfältig berücksichtigt werden. Auf der anderen Seite erhält der Designprozess eines DZ das Potenzial, wichtige Fragen bereits frühzeitig zu berücksichtigen.

Tabelle 1 definiert eine exemplarische Übersicht von Faktoren, deren Betracht erforderlich ist, um Nachhaltige Digitale Zwillinge zu definieren. Auf der technischen Seite sind kritische Aspekte des Digitalen Zwillings der automatisierte Informationsfluss, die Datenverarbeitung und die Entscheidungsfindung, die häufig auf maschinellen Lernmodellen basiert. Ein ungeeigneter Entwurf kann Verzerrungen enthalten, die durch algorithmische Rückkopplungsschleifen unerwünschte Auswirkungen verstärken. Diese Situation wird durch die Kombination mehrerer und voneinander abhängiger Modelle des maschinellen Lernens, die sich auf einzelne, aber miteinander verbundene Aspekte des relevanten Objekts und seiner Umgebung konzentrieren, noch verschärft werden.

Tab. 1: Exemplarische Faktoren und Abhängigkeiten eines Nachhaltigen Digitalen Zwillings

	Ökologisch	Technisch	Sozial (Ethisch, Rechtlich)
<b>Stakeholder</b>	Tiere, Pflanzen, Boden, Wasser, Luft	Daten, Modelle, Algorithmen, Maschinen, Infrastruktur	Landwirte, Hersteller, Konsumenten, Gesetzgeber, Gesellschaft
<b>Treiber</b>	Indirekte ökologische Effekte, Umschichtung von Umweltressourcen	Datenabhängigkeiten, mangelnde Transparenz, geringe Sicherheitsniveaus, Vendor Lock	Mangel an Fachwissen, Fokus Monokulturen und Cash-Crops,
<b>Effekte</b>	Unerwünschte Nebenwirkungen, unbekannte Abhängigkeiten und Wechselwirkungen	kaskadierende Fehlerausbreitung, Single Point of Failure, unmanagebare Komplexität, Datenmissbrauch	Monopolisierung, geringe Diversität, hohe Fragilität, hohe externe Abhängigkeiten, Verlust der Unabhängigkeit, Verlust von Fachwissen
<b>Lösungsansätze</b>	intuitive Benutzeroberflächen, transparentes AI-Design, Daten- und Technologiestandards, Erhöhung der Biodiversität durch verbesserte Fruchtfolgen, Anbau von Mischkulturen, C-Sequestration, Erhöhung der Nutzungseffizienz der Ressourcen (z. B. Wasser, Düngemittel, Pflanzenschutzmittel etc.	Explainable Artificial Intelligence (XAI), Security and Privacy by Design, FAIR-Data-Standards, verteilte Modelle	bessere Ausbildung, freie Technologien, Open Data (FAIR), Interoperabilitäts-Standards, gesetzliche Vorgaben

Da die Erklärbarkeit und Transparenz eines einzelnen Modells bereits sehr begrenzt ist, entsteht durch den Aufbau eines digitalen Zwillings, der Daten zwischen mehreren Modellen austauscht und dann die Modellausgaben als Input für andere Modelle, Korrelationen und Berechnungen weiterverwendet, ein komplexer Informationsfluss. Diese direkten und versteckten Abhängigkeiten beim maschinellen Lernen verringern die Transparenz des Systems und wirken sich wiederum auf die Wartbarkeit sowie Fehlerverfolgung aus und können zu unerwünschten emergenten Effekten und Rückkopplungsprozessen führen (vgl. MALLINGER, PURCELL & NEUBAUER, 2022; MALLINGER & BAEZA-YATES, 2024).

Die zentrale Datenspeicherung beim Anbieter (Vendor-Lock-in), die Monopolisierung der Infrastruktur und des technologischen Know-hows sowie der primäre Fokus auf Multi-User-Design und Monokulturen bzw. Cash-Crops können zu unerwünschten systemischen Effekten führen, die letztlich eine nachhaltige Landwirtschaft behindern. Ohne eine sorgfältige Abwägung der Bedürfnisse, Anreize und Abhängigkeiten der beteiligten Stakeholder könnte ein gewinnorientiertes DZ-Design die Fehlerquellen, den Verlust der Kulturpflanzenvielfalt und Biodiversität, mangelndes Vertrauen in Technologien und gesellschaftliche Ungleichgewichte verstärken. Das technologische Design muss daher soziale Rückkopplungsmechanismen berücksichtigen und ein sorgfältiges Gleichgewicht der Werte ermöglichen, ohne bestehende Abhängigkeiten weiter zu verstärken.

### **3.3 Die Anwendungsfälle**

Die Umsetzung der Anwendungsfälle folgt dem Lebenszyklusmodell für Digitale Zwillinge in der Landwirtschaft. Nachfolgend werden drei typische Beispiele aus den Bereichen Ackerbau, Tierhaltung und Grünland beschrieben, die im Rahmen des Projekts als DZ konzipiert und umgesetzt wurden.

#### **3.3.1 Ackerbau**

Für eine weitestgehend lückenlose Aufzeichnung der erforderlichen Produktionsmaßnahmen wurde im Zuge des Projekts die Etablierung der Datenaufzeichnungen mittels eines am Traktor montierten Rechners durchgeführt. Alle nicht digitalisierten Geräte (Grubber, Egge, Striegel, Feldspritze etc.) werden via eines RFID-Tags

am Gerät identifiziert. Mittels GPS/RTK Erfassung der Positionsdaten während des gesamten Maschineneinsatzes können Ort und Zeit bzw. Dauer der Arbeiten erfasst werden. Sofern verfügbar erfolgt die Datenerfassung unter Verwendung von ISOBUS-fähigen Anbaugeräten, um möglichst genaue Betriebsmittelzuweisungen pro Schlag/Teilfläche zu erhalten. Die Messwerte werden in ein Softwaresystem mit Datenbank übertragen, das eine Integration mit ergänzenden Wetterdaten, Bodendaten und Satellitendaten vornimmt. Hierbei wird vor allem auf eine umfangreiche Beschreibung der Meta-Daten geachtet, um die Auffindbarkeit, Vernetzung und Reproduzierbarkeit zu erhöhen. Die Wetterdaten werden von den vorhandenen Wettermessstationen automatisiert bezogen. Wetterprognosedaten werden über Wetterprovider bezogen. Zusätzlich werden Satellitendaten (Sentinel, Landsat, Modis etc.) verglichen, ob hier Inhomogenitäten innerhalb eines Schlages mit für den Anwendungsfall notwendigen Bodenparametern (Wasserverfügbarkeit, Bodenerwärmung, Tiefgründigkeit usw.) korrelieren.

Das Pflanzensimulationsmodell des DZ (basierend auf MANSCHADI et al., 2022) nutzt diese Daten, um das Wachstum und den Ertrag der Kulturpflanzen unter gegebenen Bedingungen (Wetter, Boden, Management) zu berechnen. In Kombination mit Datenassimilation werden die Satellitendaten verwendet, um die Genauigkeit der Modelprognosen zu verbessern. Ziel des Anwendungsfalles ist die Modellierung der Nährstoffaufnahme, um die Bestimmung günstiger Düngetermine sowie optimale saison-spezifische Düngermengen durchführen zu können. Die Trockenmasse der Kulturpflanze sowie die Ertragsentwicklung wird modelliert. Im Weiteren soll mit den erhobenen Wetterdaten, den gesetzten Bearbeitungsmaßnahmen sowie der errechneten Evapotranspirationsrate eine Berechnung des Bodenwassers erfolgen, um eventuelle Bewässerungsgaben rechtzeitig prognostizieren zu können. Die Modellergebnisse werden in Form eines ISOXML-Dokuments gemäß ISO-Norm ISO 11783-10:2015 als Grundlage für den Datenaustausch herangezogen, sofern am Traktor keine Onlineverbindung besteht. Auf ausgewählten Versuchsparzellen wird ein Parzellenmähdrescher verwendet, der die Erntedaten, wie die Trockenmasse, Frischmasse, Feuchtegehalt, aufzeichnet und damit Ground-Truth für die Validierung der Modellergebnisse liefert.

### 3.3.2 Tierhaltung

Der fortschreitende Klimawandel führt zu einer negativen Beeinflussung von Tiergesundheit und -wohlbefinden und trägt zu einer zusätzlichen Belastung der Umwelt bei. Ohne entsprechende Gegenmaßnahmen entsteht ein „Teufelskreis“ aus der Interaktion von Tiergesundheit, Umweltauswirkungen und Klimawandel. Die Kombination aus Veränderung der Lufttemperatur, der Niederschläge sowie der Häufigkeit und Intensität von Extrem-Witterungsbedingungen hat neben der direkten Einwirkung auf das Tier auch Auswirkungen auf die Menge, Qualität und die Zusammensetzung des Futters. Der beobachtete Anstieg der Pilzkontamination in Grundfuttermitteln, der zu erhöhtem Mykotoxingehalt in der Futtermittelration führt, ist ein Beispiel für die (indirekte) negative Beeinflussung der Tiergesundheit und des Wohlbefindens (BERNABUCCI, 2011).

Bei Milchkühen ist mit der zunehmenden globalen Erwärmung ein vermehrter Hitzestress verbunden, der zu einer verminderten Futteraufnahme und Wiederkauaktivität führt (BEAUCHEMIN, 1991). Hierdurch wird die Milch- und Fruchtbarkeitsleistung der Tiere gefährdet und gleichzeitig auch das Risiko für das Auftreten von Erkrankungen erhöht. Die frühzeitige Erkennung von Hitzestress kann durch Einleiten geeigneter Gegenmaßnahmen (natürliche Luftzuführung in Stallungen, Einsatz von Ventilatoren, Vernebelung von Wasser etc.) dazu beitragen, das Wohlbefinden und die Tiergesundheit zu steigern. In einem ersten Anwendungsfall wird der Zusammenhang zwischen Temperatur und relativer Luftfeuchte auf die Wiederkauaktivität von Kühen im Stall und auf der Weide evaluiert. Darauf aufbauend soll ein Simulationsmodell als DZ erstellt werden. Hierzu wurde die benötigte technische Ausstattung am Lehr- und Forschungsgut (VetFarm) an der Veterinärmedizinischen Universität geschaffen. Die Wiederkauaktivität der Tiere wird kontinuierlich mittels eines am Ohr befestigten 3D-Beschleunigungssensors erfasst. Für die kontinuierliche Aufzeichnung der Umweltbedingungen im Stall und auf der Weide wurden eine Wetterstation angeschafft sowie zahlreiche Sensoren zur Messung von Temperatur und relativer Luftfeuchte im Stall installiert. Alle an der VetFarm verwendeten (Sensor-)Systeme sind zeitsynchronisiert und die jeweils erfassten Daten werden in einer zentralen Datenbank gespeichert. Hierdurch ist es möglich, dass zeitliche Abhängigkeiten von Ereignissen und gegebenenfalls „spezifische Muster“ in den Daten identifiziert werden können.

Der Einfluss von steigenden Temperaturen, längeren Hitzeperioden und Temperaturextremen auf das Verhalten, die Tiergesundheit und das Wohlbefinden von Kälbern wird in einem weiteren Anwendungsfall untersucht. Sowohl Hitze- als auch Kältestress können die Futtermittelaufnahme, die Aktivität, das Wachstum, das Verhalten und verschiedene physiologische Parameter von Jungtieren beeinflussen. Wie zuvor für Milchkühe beschrieben, hat die relative Luftfeuchte auch bei Kälbern einen Einfluss auf das Entstehen von Hitzestress. Dieser wird häufig über den sogenannten „THI“ (Temperature-Humidity-Index) ermittelt. Im Gegensatz zu adulten Kühen sind bei Kälbern aber noch keine THI-Grenzwerte für die thermoneutrale Zone definiert (WANG et al., 2022). Diese sollen im Rahmen des Teilprojekts ermittelt werden. Zur Projektdurchführung wurde der Kälberstall an der VetFarm mit Milchtränke- und Kraftfutterautomaten, Wasseraufnahmestationen mit integrierter Körperwaage sowie einem digitalen Videoaufnahmesystem ausgestattet. Anhand der Auswertungen von Daten zur Futter- bzw. Wasseraufnahme (z. B. Menge, Intervall, Geschwindigkeit von Tränke- und Kraftfutteraufnahme), von am Tier positionierten Beschleunigungssensoren und Video-klassifiziertem Verhalten sowie anhand von täglichen klinischen Untersuchungen sollen Art und Ausmaß der hitze- bzw. kalteinduzierten Veränderungen bei Kälbern erfasst werden. Das Ziel ist die Ermittlung von THI-Grenzwerten, die zur frühzeitigen Einleitung geeigneter Gegenmaßnahmen genutzt werden können, um Hitze- und Kältestress zu vermeiden. Diese Regelkreisläufe sollen ebenfalls als DZ realisiert werden.

### **3.3.3 Grünland**

Der dritte Anwendungsfall zur „Schätzung von Aufwuchsmenge und -qualität von Grünlandbeständen“ ist ein interuniversitäres Szenario aus Pflanzenbau und Tierhaltung. Die Weidehaltung von Rindern wird als vorteilhaft für das Wohlergehen der Tiere erachtet und zunehmend von Verbraucherseite gefordert (MEE, 2020). Die Deckung des Nährstoffbedarfs der Kühe ist bei Weidehaltung jedoch oftmals eine Herausforderung, da im Jahresverlauf die Menge und Qualitäten des Grasaufwuchses stark variieren. Sowohl ein zu früher als auch ein zu später Schnitzeitpunkt haben negative Einflüsse auf Ertrag und Qualität des Futters sowie auf Leistung und Tiergesundheit. Bei optimalem Management kann die Weidehaltung jedoch dazu beitragen, eine hohe Milchleistung bei gleichzeitig guter Tiergesundheit und niedrigen Futtermittelkosten zu erzielen (SANDERSON, ROTZ, FULTZ & RAY-

BURN, 2001). Hierzu ist eine möglichst exakte Abschätzung von Menge und Qualität des Weideaufwuchses notwendig. Für das Teilprojekt wurde ein Herbometer, auch als „Rising Plate Meter“ (RPM) bezeichnet, zur halbautomatischen Schätzung der Aufwuchsmenge sowie ein Nah-Infrarot-Spektroskopie-Gerät (NIRS) zur Messung der Qualitätseigenschaften (u. a. von Trockenmasse-, Rohprotein-, ADF-, NDF- und Rohaschegehalten) angeschafft. Zunächst wurden das RPM und das NIRS unter den an der VetFarm herrschenden Umweltbedingungen evaluiert. Hierzu wurden Vergleichsproben gewonnen, die zur nasschemischen Analyse an ein Referenzlabor verschickt wurden. Die im Rahmen des Projekts ermittelten Daten zu Aufwuchsmenge und -qualität sowie kontinuierlich erhobene Klima- und Bodenfeuchtedaten werden zur Erstellung und Verfeinerung eines Modells zur Vorhersage von Grünlanderträgen im Rahmen des DZ verwendet.

Die Einsatzmöglichkeiten von (Sensor-)Technologien und Künstlicher Intelligenz in der Tiermedizin und Tierhaltung haben bereits Einzug in das veterinärmedizinische Curriculum gefunden und werden z. B. im Rahmen der „Klinischen Rotation“ und in Wahlpflichtveranstaltungen zum „Precision Livestock Farming“ vermittelt. Die Entwicklung von DZ ist Bestandteil des Masterstudiengangs „Precision Animal Health“, der erstmalig seit 2023 an der Vetmeduni angeboten wird. Die in diesem Studiengang entwickelten Simulationsmodelle sollen zukünftig in der Ausbildung von Studierenden der Veterinärmedizin, Agrar- und anderer Biowissenschaften genutzt werden.

## 4 Zusammenfassung

Das Projekt digital.twin.farm legt die Grundlagen für interdisziplinäre und interuniversitäre Forschung und Lehre zum Thema Digitale Zwillinge in der Landwirtschaft. Es definiert typische landwirtschaftliche Prozesse, die prototypisch als Digitale Zwillinge umgesetzt werden. Ein wesentliches Augenmerk des Projekts und ein Alleinstellungsmerkmal gegenüber zahlreichen anderen Projekten im Bereich der Agrarwissenschaften besteht in der Betrachtung und Abwägung der Nutzen und Risiken von Digitalen Zwillingen in der Landwirtschaft nach mehreren vorab definierten Kriterien.

Digitale Zwillinge in der Landwirtschaft sind aufgrund ihrer vielfältigen technologischen, ökologischen und sozialen Abhängigkeiten besonders anfällig für verschiedene Risiken. Ohne angemessenes Management können die systemischen Auswirkungen dieser Risiken verschiedene Designanforderungen gleichzeitig negativ beeinflussen (z. B. Wiederverwendbarkeit, Skalierbarkeit, Wartbarkeit, Datenschutz, Sicherheit, ethische Aspekte etc.) und behindern letztendlich die Einführung der Technologie. Diese interdisziplinären Herausforderungen werden nicht allein durch Designentscheidungen bewältigbar sein, sondern umfangreiche Regulierungen erfordern. Um zukünftige Forschung zu DZs in der Landwirtschaft zu unterstützen, müssen sozio-ökologische Belange berücksichtigt und als Designanforderungen für eine nachhaltige Entwicklung von DZ formuliert werden (vgl. MALLINGER, PURCELL & NEUBAUER, 2022).

## 5 Literaturverzeichnis

- Alter, A.** (2017). *Irresistible: The rise of addictive technology and the business of keeping us hooked*. Penguin.
- Beauchemin, K.** (1991). Ingestion and mastication of feed by dairy cattle. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 7(2), 439–463.
- Bernabucci, U. C.** (2011). Aflatoxin b1 and fumonisin B1 affect the oxidative status of bovine peripheral blood mononuclear cells. *Toxicol. Vitr.*, 684–691. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2011.01.009>
- Christiaensen, L., Rutledge, Z. & Taylor, J.** (2020). *The Future of Work in Agriculture Some Reflections*. World Bank: Washington, DC, USA,.
- Cramer, B. W.** (2017). The Attention Merchants: The Epic Scramble to Get Inside Our Heads. *Journal of Information Policy*, 268–271.
- Farooq, M., Sohail, O., Abid, A. & Rasheed, S.** (2022). A survey on the role of IoT in agriculture for the implementation of smart livestock environment. *IEEE Access*, 10, 9483–9505. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3142848>
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C. & Barlow, C.** (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges. *IEEE Access* (8), 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>

- García, R., Aguilar, J., Toro, M., Pinto, A. & Rodríguez, P.** (2020). A systematic literature review on the use of machine learning in precision livestock farming. 179. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105826>
- Grievess, M. & Vickers, J.** (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In J. F. Kahlen (Hrsg.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Springer.
- Hoxhallari, K., Purcell, W. & Neubauer, T.** (2022). *The potential of Explainable Artificial Intelligence in Precision Livestock Farming*. 10th European Conference on Precision Livestock Farming.
- Ingram, J. & Maye, D.** (2020). What Are the Implications of Digitalisation for Agricultural Knowledge? *Front. Sustain. Food Syst.*, 4.
- Jo, S., Park, D., Park, H. & Kim, S.** (2018). Smart Livestock Farms Using Digital Twin: Feasibility Study. In 2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC) (S. 1461–1463). <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8509497>
- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J. & Hicks, B.** (2020, 05). Characterising the digital twin: A. 29, 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.>
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J. & Sihn, W.** (2018). Digital twin in. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifa-col.2018.08.474>
- Mallinger K. & Baeza-Yates R. (2024). Responsible AI in Farming: A Multi-Criteria Framework for Sustainable Technology Design. *Applied Sciences*, 14(1), 437. <https://doi.org/10.3390/app14010437>
- Mallinger, K., Purcell, W. & Neubauer, T.** (2022). *Systemic design requirements for sustainable digital twins in precision livestock farming*. Proceedings of the 10th European Conference on Precision Livestock Farming.
- Manschadi, A., Palka, M., Fuchs, W., Neubauer, T., Eitzinger, J. & Oberforster, M.** (2022). Performance of the SSM-iCrop model for predicting growth and nitrogen. *European Journal of Agronomy*, 135.
- Mee J.F., B.L.** (2020). Heat stress on calves and heifers: A review. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 11(1), 1–8.

- Papernot, N., McDaniel, P., Jha, S., Fredrikson, M. & Celik, Z. B.** (2016). The Limitations of Deep Learning in Adversarial Settings. 2016 IEEE European Symposium on Security and Privacy (EuroS&P) (S. 372–387).
- Purcell, W. & Neubauer, T.** (2023). Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-art review. *Smart Agricultural Technology*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100094>
- Purcell, W., Neubauer, T. & Mallinger, K.** (2023). Digital Twins in agriculture: challenges and opportunities. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 61.
- Raba, D., Tordecilla, R. D., Copado, P. & Juan, A. A. & Mount, D.** (2022). A Digital Twin for Decision Making on Livestock Feeding. *Interfaces, INFORMS*, 52(3), 267–282.
- Sanderson, M., Rotz, C., Fultz, S. & Rayburn, E.** (2001). Estimating forage mass with a commercial capacitance meter, rising plate meter, and pasture ruler. *Agronomy Journal*, 93(6), 1281–1286.
- Smith, M.** (2018). Getting value from artificial intelligence in agriculture, over the next 10+ years. <https://doi.org/10.31220/osf.io/q79mx>
- Stark, R. & Damerou, T.** (2019). Digital twin. In S. Chatti & T. Tolio (Hrsg.), *CIRP Encyclopedia of Production* (S. 1–8). SpringerLink.
- Tao, F., Qi, Q., Wang, L. & Nee, A.** (2019). Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0. *Correlation and comparison*. 5(4), 653–661. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>
- Tebaldi, L., Vignali, G. & Bottani, E.** (2021). Digital Twin in the agri-food supply chain: a literature review. In A. Dolgui, A. Bernard, D. Lemoine, G. von Cieminski & D. Romero (Hrsg.), *Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems*, IFIP Advances in Information and Communication Technology (S. 276–283). Springer.
- van der Burg, S., Kloppenburg, S., Kok, E. & van der Voort, M.** (2021). Digital Twins in agri-food: societal and ethical themes and questions for further research. *NJAS. Impact Agric Life Sci*, 93, 98–125. <https://doi.org/10.1080/27685241.2021.1989269>
- van Evert, F. K. Berghuijs, H. N. C., Hoving, I. E. et al.** (2021). A digital twin for arable and dairy farming. In *Precision Agriculture, Proceedings*. Vol. 1 (p. 919–925). Wageningen Academic Publishers.

**Verdouw, C., Tekinerdogan, B., Beulens, A. & Wolfert, S.** (2021). Digital twins in smart farming. *Agricultural Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103046>

**Wang, J., Li, J., Wan, F., Xiao, J., Wang, Y., Yang, H., . . . Cao, Z.** (2022). Heat stress on calves and heifers: A review. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s40104-020-00485-8>

## Autoren



Thomas NEUBAUER || TU Wien, Institut für Information Systems Engineering || Favoritenstraße 9–11, A-1040 Wien

<https://www.tuwien.ac.at>

[thomas.neubauer@tuwien.ac.at](mailto:thomas.neubauer@tuwien.ac.at)



Alexander BAUER || Universität für Bodenkultur Wien, Department für Nachhaltige Agrarsysteme, Institut für Landtechnik || Peter-Jordan-Straße 82, A-1190 Wien

<https://www.boku.ac.at>

[alexander.bauer@boku.ac.at](mailto:alexander.bauer@boku.ac.at)



Johannes HEURIX || TU Wien, Institut für Information Systems Engineering || Favoritenstraße 9–11, A-1040 Wien

<https://www.tuwien.ac.at>

[johannes.heurix@tuwien.ac.at](mailto:johannes.heurix@tuwien.ac.at)



Michael IWERSEN || Veterinärmedizinische Universität Wien,  
Universitätsklinik für Wiederkäuer, Abteilung Bestandsbetreuung  
|| Veterinärplatz 1, T-1210 Wien

<https://www.bestandsbetreuung.at>

[michael.iwersen@vetmeduni.ac.at](mailto:michael.iwersen@vetmeduni.ac.at)



Kevin MALLINGER || TU Wien, Institut für Information Systems  
Engineering || Favoritenstraße 9–11, A-1040 Wien

<https://www.tuwien.ac.at>

[kevin.mallinger@tuwien.ac.at](mailto:kevin.mallinger@tuwien.ac.at)



Ahmad M. MANSCHADI || Universität für Bodenkultur Wien,  
Institut für Pflanzenbau || Konrad-Lorenz-Str. 24, A-3430 Tulln

<https://boku.ac.at/dnw/pb>

[manschadi@boku.ac.at](mailto:manschadi@boku.ac.at)



Warren PURCELL || TU Wien, Institut für Information Systems  
Engineering || Favoritenstraße 9–11, A-1040 Wien

<https://www.tuwien.ac.at>

[warren.purcell@tuwien.ac.at](mailto:warren.purcell@tuwien.ac.at)



Andreas RAUBER || TU Wien, Institut für Information Systems  
Engineering || Favoritenstraße 9–11, A-1040 Wien

<https://www.tuwien.ac.at>

[andreas.rauber@tuwien.ac.at](mailto:andreas.rauber@tuwien.ac.at)