

# Prüfmethode zur Bestimmung der Schwarzfleckigkeitsneigung mittels mechanischer Belastung von Kartoffelgewebe

Lukas Poppa, Ludger Frerichs, Jintian Liu, Markus Böhl

Durch stetige Verbesserungen in der Ernte- und Lagerungstechnik von Kartoffeln in den letzten Jahren konnten externe Kartoffelbeschädigungen wie Bruch oder Abschürfungen reduziert werden. Die Schwarzfleckigkeit der Kartoffelknolle, d. h. die durch mechanische Belastung verursachte innere Schädigung, lässt sich jedoch durch klassische Entwicklungswerkzeuge wie praktische Versuche nur schlecht verringern. Durch die Dauer von etwa zwei Tagen zur Ausbildung der Schwarzfleckigkeit nach der mechanischen Belastung, ist es oft unklar, in welchem Prozessschritt und unter welchen Umgebungsbedingungen die Schäden auftreten.

Die Partikelsimulation landwirtschaftlicher Ernteprozesse bietet umfassende Möglichkeiten zur Verbesserung von Maschinenprozessen und zur Verringerung von Ernteverlusten. Mit der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) ist es möglich, einen tiefen Einblick in die Ernte- und Transportprozesse von Kartoffeln zu erhalten. Die DEM stellt die Kartoffelknollen als Partikel und die Maschinenteile als Geometrielemente dar. Die Geometrielemente sind stationär oder folgen vordefinierten Bewegungen, während die Bewegung der Partikel auf der Grundlage von Kontaktgesetzen und der Materialeigenschaften berechnet wird. Das globale Partikelmodell der DEM kann Kontaktspannungen auf Partikelebene vorhersagen, ist jedoch nicht in der Lage, lokale Schäden wie die Schwarzfleckigkeit zu beschreiben. Der vorliegende Beitrag stellt einen Prüfstand zur Untersuchung der mechanisch induzierten Verfärbung von Kartoffelgewebe vor und beschreibt ein Modell zur Abbildung lokaler Schwarzfleckigkeitsschäden für die DEM.

Aufgrund der inhomogenen Zusammensetzung der Kartoffelknolle aus mehreren Gewebearten werden auf dem entwickelten Prüfstand die drei wesentlichen Gewebearten Rinde, äußeres Mark und inneres Mark getrennt voneinander untersucht. Die mechanische Belastung der Gewebeprobe erfolgt bis zu einer maximalen Stauchung von 20, 40 und 50 % sowie bei einer definierten Verformungsgeschwindigkeit von 0,1 bis 10000 %/s, bezogen auf die Probenhöhe. Die Farbänderung der Proben wird nach etwa 48 Stunden gegenüber unbelastetem Referenzgewebe untersucht. Die Versuche wurden bei einer Knollen- und Umgebungstemperatur von 14 bis 20 °C durchgeführt. Der Zusammenhang zwischen der Farbänderung und den Belastungsgrößen Stauchung und Verformungsgeschwindigkeit kann durch eine empirische Gleichung beschrieben werden. Durch Implementierung dieser Gleichung im Kontaktmodell der DEM als Schadensmodell kann die Erzeugung von Schwarzfleckigkeit in realen Prozessschritten in Simulationen vorhergesagt und untersucht werden. Der Schadenswert der einzelnen Partikel kann mit den Schädigungen der realen Kartoffeln verglichen und somit das Schadensmodell validiert werden.

## Schlüsselwörter

Schwarzfleckigkeit, Kartoffel, Simulation, Schadensmodell, Prüfstand

Die Kartoffel gehört, nach den verschiedenen Getreidearten, mit einer jährlichen Erntemenge von über 350 Mio. t (FAO 2021) zu den wichtigsten Grundnahrungsmitteln weltweit. Beschädigungen an Kartoffelknollen während der Ernte reduzieren deren Lager- und Vermarktungsfähigkeit und damit den finanziellen Ertrag der Landwirte (PETERS 1999). Die Schäden werden vorwiegend durch Stoßbelastungen bei Lade- und Transportvorgängen hervorgerufen. Es wird zwischen externen Schäden und internen Schäden unterschieden (HUGHES 1980, HEINECKE 2007). Die Schwarzfleckigkeitsneigung hängt zudem auch stark von der Knollenphysiologie ab (WULKOW 2009). Externe Schäden der Kartoffelschale und dem darunterliegenden Gewebe treten bei starken Stößen oder durch Reibung auf. Bei kleinen und mittleren Stößen können innerhalb der Zellen Vakuolen zur Stärkespeicherung beschädigt werden. Enzymatische und chemische Reaktionen führen zur Bildung von Melanin und zur Verfärbung der Zelle, die schließlich als Schwarzfleckigkeit sichtbar wird (HEINECKE 2007). Bei stärkerer Belastung können Zellen innerhalb der Kartoffel zerstört werden und Hohlräume entstehen, die bakterielle Infektionen begünstigen. Schwarzfleckigkeit kann sich so von einem kosmetischen Mangel zu einem Problem von Kartoffelfäulnis entwickeln. Eine höhere Anzahl verdorbener Kartoffeln kann durch die erhöhte Belastung mit Erregern und der damit verbundenen steigenden Temperatur zu einer Ausbreitung des Infektionsherds auch auf unbeschädigte Kartoffeln führen und so das ganze Lager verderben. Äußerlich beschädigte Kartoffeln lassen sich im Prozess leicht identifizieren und aussortieren sowie deren Ursachen identifizieren. Die Reduzierung der Schwarzfleckigkeit stellt somit heute die größte Herausforderung dar, da sie erst nach einer Lagerzeit von ca. 48 bis 72 Stunden sichtbar wird und nur durch Schälen oder Zerteilen der Knollen untersucht werden kann. Die Verringerung von Knollenschäden unter wechselnden Erntebedingungen durch korrekte Anpassung der Maschineneinstellungen hängt bis heute von der Erfahrung des Maschinenführers ab. Der zeitliche Abstand zwischen Ernte und Auftreten der Schwarzfleckigkeit sowie die ständig wechselnden Umgebungsbedingungen machen eine automatische Anpassung der Maschineneinstellung unmöglich. Praktische Versuche sind daher nur begrenzt in der Lage, die Maschinenteknik und Einstellgrößen weiter zu optimieren.

Die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) wird in der Landtechnik als Werkzeug zur Simulation von granularen Materialien in Förder- und Verarbeitungsprozessen eingesetzt (TIJSKENS et al. 2003). Die numerische netzfreie Methode ist in der Lage, die räumliche Bewegung des granularen Materials durch Abbildung als Partikel zu simulieren und wurde ursprünglich von Cundall und Strack (1979) entwickelt. Die Partikelbewegung wird nach dem zweiten Newton'schem Axiom berechnet und durch die Interaktion mit anderen Partikeln und Maschinenteilen, die als Geometrielemente abgebildet werden, beeinflusst. Zusätzlich können Feldkräfte wie Gravitation oder elektromagnetische Felder berücksichtigt werden. Die Partikel können als netzgeometrische Körper dargestellt werden, um spezifische Formen anzunehmen. Die Anwendung von sphärischen Partikeln oder zusammengesetzten Partikeln aus mehreren Sphären bietet jedoch in vielen Fällen aufgrund des deutlich geringeren Rechenaufwands große Vorteile (COETZEE 2020). Partikel sowie Geometrielemente werden als formstarr definiert, wobei die Interaktionskraft zwischen zwei Partikeln oder einem Partikel und einem Geometrielement aus der rechnerischen Überlappung und dem Kontaktmodell bestimmt wird. Die DEM-basierte Simulation zeigt Vorteile bei der schnellen Beurteilung neuer Maschineneinstellungen und der Optimierung von Ernteprozessen bei gleichzeitiger Kontrolle über die Umgebungsbedingungen. Das Fehlen von Informationen über die lokale Spannungsbeanspruchung im Inneren der Partikel und den entsprechenden Schädigungsgrad führt jedoch zu einer ungenauen Vorhersage der Prozessqualität und damit zum selben Nachteil der Feldversuche.

Vor diesem Hintergrund zielt das DFG-Projekt “A comprehensive model for the prediction and analysis of internal potato tuber damage in postharvest processes” darauf ab, ein Schadensmodell für Kartoffelknollen in einem Simulationsmodell vorzuschlagen. In diesem Projekt soll zuerst die innere Schädigung, aufgrund verschiedener Belastungs- und Stressfaktoren, anhand der hervorgerufenen Verfärbung des Kartoffelgewebes analysiert, anschließend ein Schadensmodell auf der Gewebeskala entwickelt, nachfolgend das Simulationsmodell durch die Integration des Schadensmodells erweitert und schließlich validiert werden.

In diesem Beitrag wird der erste Schritt zur Entwicklung eines Schadensmodells für Kartoffelknollen aufgezeigt: Das Testverfahren zur Verformung des Gewebes unter kontrollierten Bedingungen und zur Messung der aus der definierten Belastung resultierenden Farbveränderung (Abbildung 1). Die einzelnen Schritte des Testverfahrens sind:

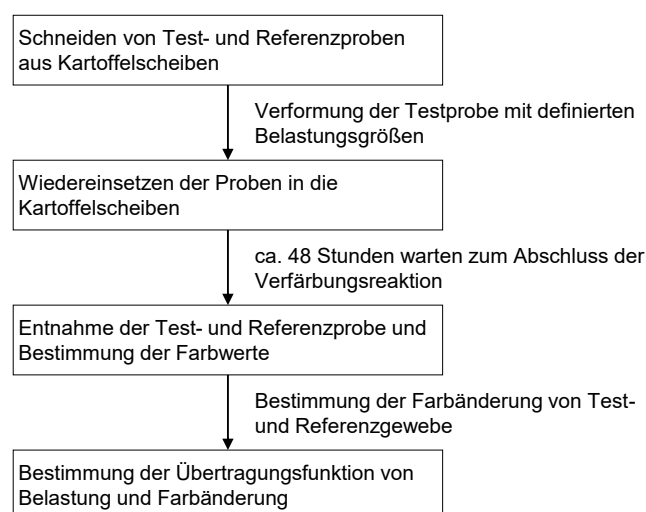


Abbildung 1: Schritte des Testverfahrens zur Verformung und Messung der resultierenden Farbänderung von Kartoffelgewebe

## Material und Methoden

### Versuchskartoffeln und Gewebetypen

Für die Untersuchungen wurden Kartoffelknollen der Sorte Afra verwendet, da diese vergleichsweise stark zur Schwarzfleckigkeit neigt (BUNDESSORTENAMT 2015). Zur Vermeidung von Vorschädigungen wurden die Versuchskartoffeln (cv. ‚Afra‘) mit einem Schwadleger möglichst schonend gerodet und anschließend händisch selektiert und eingesammelt. Mit diesem Verfahren können die Belastungen auf die Kartoffelknollen minimiert werden und weder externe noch interne Vorschädigungen wurden bei den später untersuchten Gewebeproben identifiziert. Zur Reduktion des Einflusses der Knollenphysiologie auf die erzielten Ergebnisse werden die Versuchsreihen in jeweils engen Zeitfenstern durchgeführt. Zusätzlich werden nur Knollen des Quadratmaßes 50 bis 55 mm für die Versuche verwendet. Die Kartoffelknollen wurden bei idealen Bedingungen von 5 °C und etwa 99% relativer Feuchte gelagert. Die Versuchsreihen wurden wenige Tage nach der Ernte durchgeführt und dann nach 4 und 8 Monaten Lagerung wiederholt. Es wurden Kartoffelknollen aus den Erntejahren 2021 und 2022 von jeweils einem Schlag untersucht.

Der inhomogene Aufbau der Kartoffel erfordert die Untersuchung der drei verschiedenen inneren Gewebetypen. Das Rindengewebe beschreibt eine etwa 4–10 mm dicke Schicht direkt unterhalb der

Kartoffelschale. Das äußere Mark (engl. „Perimedullary Parenchyma“) stellt das Hauptgewebe der Kartoffel dar und zeigt häufig die stärksten Verfärbungen aufgrund von Schwarzfleckigkeit. Es reicht vom Rindengewebe (engl. „Cortex“) bis zum inneren Mark (engl. „Pith“). Das innere Mark der Kartoffelknolle besitzt einen höheren Wassergehalt und ist daher leicht durchscheinend.

Aufgrund der geringen Dicke des Rindengewebes können nur kleine Proben mit einem Durchmesser und einer Höhe von jeweils 3,5 mm im Belastungsversuch untersucht werden. Aus je zwei Scheiben pro Knolle wurden mit einer speziell angefertigten Stanz- und Schneidevorrichtung eine Test- und eine zugehörige Referenzgewebeprobe gemäß den angegebenen Abmessungen herausgeschnitten. Die Referenzprobe ist notwendig, um die Farbvarianz zwischen verschiedenen Kartoffelknollen, durch die Bestimmung der relativen Farbänderung zwischen Test- und Referenzprobe derselben Knolle, zu eliminieren. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass der Farbwert (engl. „Hue“) des HSV-Farbraums am stärksten die Verfärbung des Gewebes indiziert und bereits ab einer Farbänderung von  $\Delta Hue = -5^\circ$  eine Schwarzfleckigkeit festgestellt werden kann.

Hierzu werden aus Kartoffelscheiben zylinderförmige Test- sowie Referenzproben entnommen. Die Testproben werden anschließend mit voreingestellter Stauchung und Stauchrate belastet. Nach der Belastung werden die Testproben und die unbelasteten Referenzproben in den Kartoffelscheiben zur vollständigen Farbänderung für ca. 48 Stunden bei Raumtemperatur dunkel gelagert. Die Test- und Referenzproben werden anschließend wieder den Scheiben entnommen und durch fotografische Abbildung die Farbänderung untersucht.

### **Prüfstand für exakte Verformung des Knollengewebes**

Interne Kartoffelschäden werden häufig durch Stöße gegen Maschinenteile oder gegen andere Gutstrombestandteile hervorgerufen. In den Trennverfahren innerhalb der Erntemaschinen kommt es zu Fallhöhen von etwa 200 mm, während beim Überladen in Anhänger oder Kisten Fallhöhen von bis zu 500 mm möglich sind. Diese resultieren in hohen Belastungsgeschwindigkeiten von 1.980 %/s bis zu 3.130 %/s, bezogen auf eine Knollenlänge von etwa 100 mm. Nach der Ernte können weitere Verarbeitungsschritte der Kartoffeln folgen, wie zum Beispiel das Sortieren und Reinigen in entsprechenden Anlagen mit Fallhöhen von 20 bis 200 mm und hohen Stauchungsgeschwindigkeiten sowie die Lagerung mit sehr geringen Stauchungsgeschwindigkeiten und quasistatischer Belastung.

Unter Berücksichtigung dieser Varianzen wurde ein Prüfstand zur dynamischen Belastung von Kartoffelgewebeproben entwickelt (Abbildung 2). Die Gewebeproben werden auf einem hochsensiblen piezoelektrischen Kraftsensor (9323AA, Kistler Instrumente AG, Schweiz) platziert. Ein elektrischer Servomotor dreht einen Hebel mit einer vorgegebenen Rotationsgeschwindigkeit. Dieser schlägt auf der Gewebeprobe auf und verformt diese bis zur, über einen variablen Anschlag, eingestellten Stauchung. Aufgrund der Hebellänge von 200 mm und der kleinen maximalen Verformung von 1,75 mm ist die Winkelabweichung durch die Hebeldrehung vernachlässigbar und die Stauchung wird als uniaxialer Spannungszustand betrachtet. Zusätzlich wird zum Kraftsignal die Stauchung des Kartoffelgewebes mit einer Highspeed Kamera (NX8 S2, Integrated Design Tools Inc., USA) mit einer Frequenz von bis zu 20 kHz betrachtet. Mit der gemessenen Druckkraft und der aus den Kameraaufnahmen abgeleiteten Stauchungen können wichtige Materialeigenschaften für die spätere Modellierung abgeleitet werden. Für die langsamen, quasistatischen Belastungen werden wegeregelt Druckversuche an einer üblichen Universalprüfmaschine mit einer 20-N-Kraftmesszelle durchgeführt (Z0.5, Zwick GmbH, Deutschland). Um ein Austrocknen der Proben während der langsamen Belastungsversuche

zu verhindern, werden diese in einer isotonischen Lösung durchgeführt. Mit den genannten Prüfverfahren werden Druckversuche mit drei maximalen Stauchungen von 20, 40 und 50% mit sechs verschiedenen Stauchraten in logarithmischen Stufen von 0,1%/s bis 10.000%/s, bezogen auf die Probenhöhe, durchgeführt. Die Versuche werden mit den drei genannten Gewebeproben und jeweils acht Wiederholungen durchgeführt, wodurch sich eine Versuchsanzahl von 432 Einzelversuchen je untersuchter Lagerbedingung und Erntejahr ergibt.

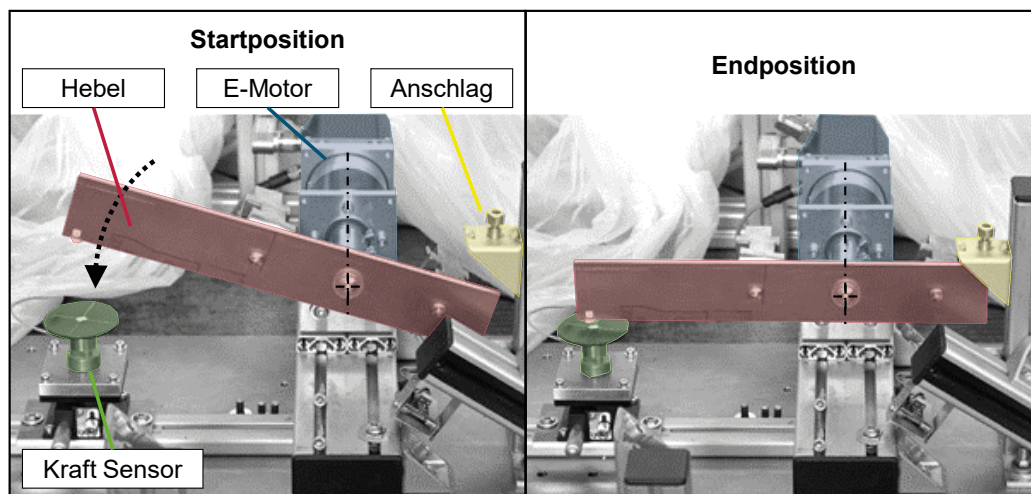


Abbildung 2: Prüfstand zur dynamischen Belastung von Kartoffelgewebeproben

### Messaufbau zur Untersuchung der Farbänderung

Nach einer etwa 48-stündigen biochemischen Farbänderungsreaktion der Test- und Referenzproben werden diese den Kartoffelscheiben wieder entnommen und auf einem Probenständer fotografiert. In Abbildung 3 wird auf der linken Seite der Messaufbau schematisch dargestellt und auf der rechten Seite eine Beispielaufnahme gezeigt. Um den Einfluss von Umgebungsbedingungen zu eliminieren, werden die Bilder in einer Dunkelkammer aufgenommen und mit speziellen LED-Lampen mit einem Farbwiedergabeindex von CRI >95 belichtet.

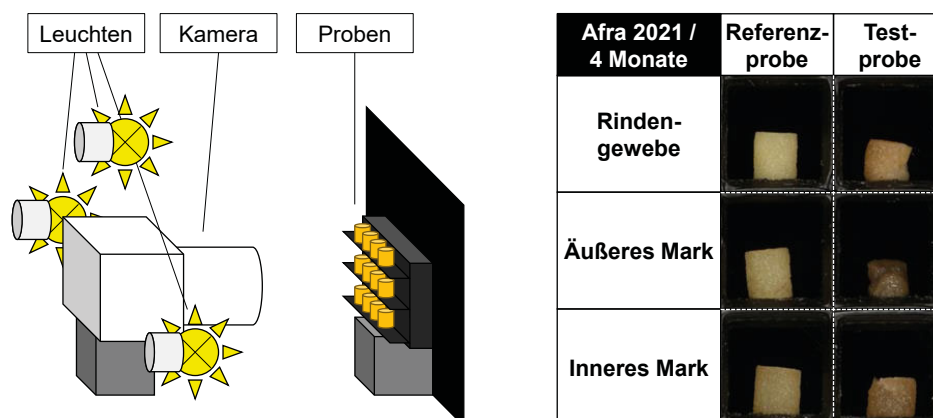


Abbildung 3: Prüfaufbau zur Farbuntersuchung von Kartoffelgewebe

Die Bilder werden in Matlab (The Mathworks Inc., USA) verarbeitet und nach Gewebetyp, maximaler Stauchung und Stauchungsgeschwindigkeit kategorisiert. Nach Entfernen des dunklen Hintergrunds können die entsprechenden Bildbereiche nach Test- und Referenzproben segmentiert und der mittlere Farbwert im HSV-Farbraum der einzelnen zugeschnittenen Bildbereiche bestimmt werden. Die relative Farbänderung zwischen Test- und Referenzprobe wird der entsprechenden Versuchseinstellung zugeordnet.

## Ergebnisse

Die Verfärbung von Gewebe des äußeren Marks ist in Abbildung 4 für verschiedene Stauchungen und Stauchraten dargestellt. Die Verfärbung zeigt eine deutliche Abhängigkeit zwischen Stauchung und Stauchrate. Bei niedriger Stauchung und niedriger Stauchungsrate tritt keine sichtbare Verfärbung auf, während eine hohe Stauchung und hohe Stauchrate eine starke Verfärbung verursachen.

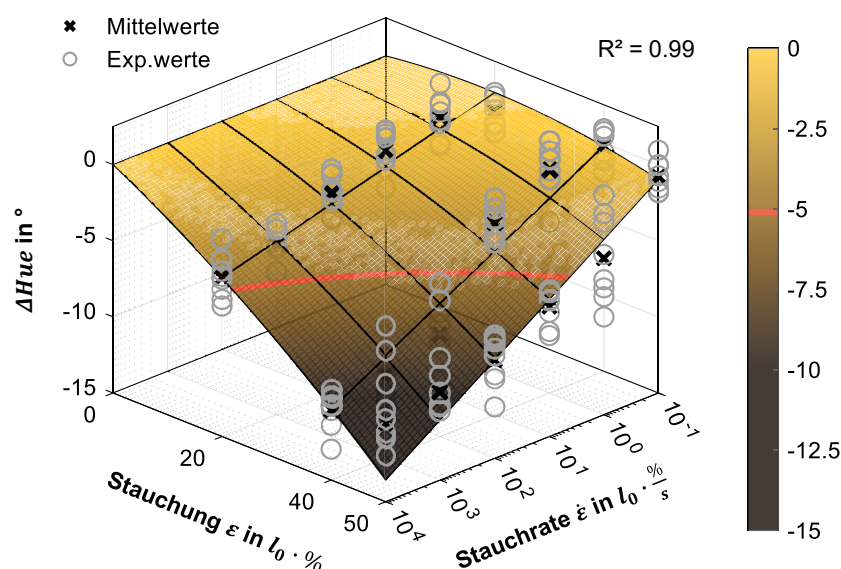


Abbildung 4: Farbänderung des äußeren Marks von erntefrischen Kartoffelknollen des Jahres 2021 nach mechanischer Belastung

Die Abhängigkeit der Änderung des Farbwertes  $\Delta Hue$  von der Stauchung  $\varepsilon$  und der Stauchrate  $\dot{\varepsilon}$  lässt sich mit einer Übertragungsfunktion unter Verwendung des „Surface-Fit“-Algorithmus von Matlab beschreiben. Ein vollständiger quadratischer Ansatz wird für den Zusammenhang zwischen Farbwertänderung, der Stauchung, dem Logarithmus der Stauchrate sowie deren Wechselwirkung angenommen. Durch Reduktion von Koeffizienten mit geringem Einfluss lässt sich die Übertragungsfunktion auf folgende Verfärbungsfunktion (Gleichung 1) reduzieren:

$$\Delta Hue = k_1 \cdot \varepsilon^2 + k_2 \cdot \varepsilon \cdot \log(\dot{\varepsilon}) \quad (\text{Gl. 1})$$

Die Verfärbungsfunktion für Gewebe des äußeren Marks der erntefrischen Kartoffelknollen des Jahres 2021 mit den Koeffizienten  $k_1 = -1,4 \cdot 10^{-3}$  und  $k_2 = -5,0 \cdot 10^{-1}$  liefert ein hohes Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,99$  und ist als gelb-schwarze Fläche ebenfalls in Abbildung 4 dargestellt. Der kritische Grenzwert zum Übergang von unbeschädigtem Gewebe zu beschädigtem Gewebe ist als rote Linie bei einer Änderung des Farbwertes von  $-5^\circ Hue$  in der Fläche dargestellt.

Der Einfluss langer Lagerzeiten auf die Schädigungsempfindlichkeit der Kartoffelknollen ist in den Abbildungen oben links und oben rechts in Abbildung 5 dargestellt. Die Empfindlichkeit des äußeren Marks nimmt bei einer Lagerzeit von acht Monaten deutlich ab. Ähnliche Effekte sind auch bei dem Rindengewebe und dem inneren Mark zu beobachten und werden daher nicht dargestellt. Selbst bei geringer Zellaktivität unter idealen Lagerbedingungen verlieren die Knollen durch Zellatmung Wasser. Es wird angenommen, dass der reduzierte Turgor der Grund für den geringeren Einfluss der Stauchrate auf die Verfärbung ist. Der Einfluss einer hohen Stauchung nimmt bei den gelagerten Knollen leicht zu. Die Standardabweichung der Verfärbung für verschiedene Einstellungen nimmt aufgrund der unterschiedlichen Entwicklung der Knollen während der langen Lagerdauer zu. Die beiden Abbildungen unten links und unten rechts in Abbildung 5 zeigen die Schädigungsempfindlichkeit von Rindengewebe und inneren Mark für erntefrische Kartoffelknollen. Beide Gewebe reagieren deutlich weniger empfindlich auf die durch die mechanische Belastung verursachte Verfärbung als das äußere Mark, wobei das innere Mark am unempfindlichsten ist.

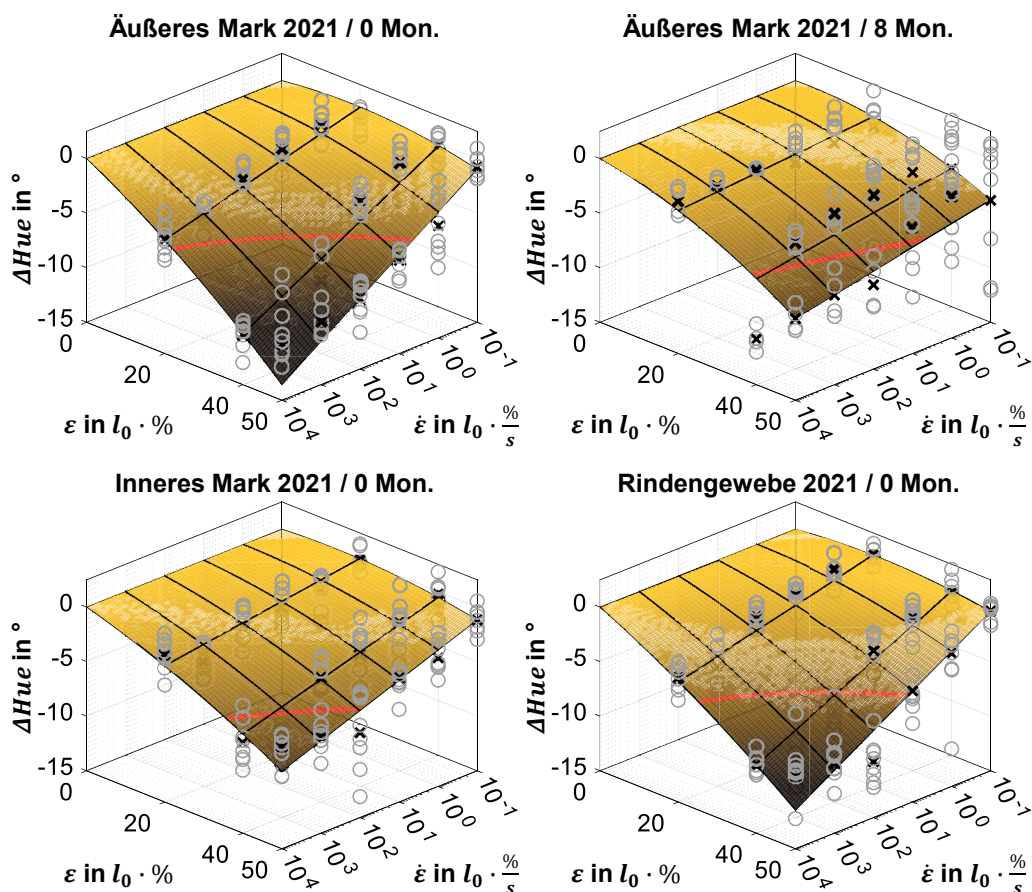


Abbildung 5: Verfärbungsempfindlichkeit nach verschiedenen Lagerdauern und Gewebetypen für das Erntejahr 2021

In Abbildung 6 kann die Verfärbungsempfindlichkeit von frischen Kartoffelknollen aus zwei aufeinanderfolgenden Erntejahren verglichen werden. Eine deutliche Abnahme der Verfärbungsneigung kann für das Erntejahr 2022 festgestellt werden. Zusätzlich wurden die Mineralstoffanteile der Kartoffelknollen des Erntejahres 2022 untersucht, wobei ein hoher Kaliumgehalt von 2,5% bezogen auf

die Trockenmasse festgestellt werden konnte. Eine gute Kaliumversorgung kann die Schwarzfleckigkeitsempfindlichkeit und damit die Verfärbungsneigung der Kartoffeln reduzieren (HEINECKE 2007).

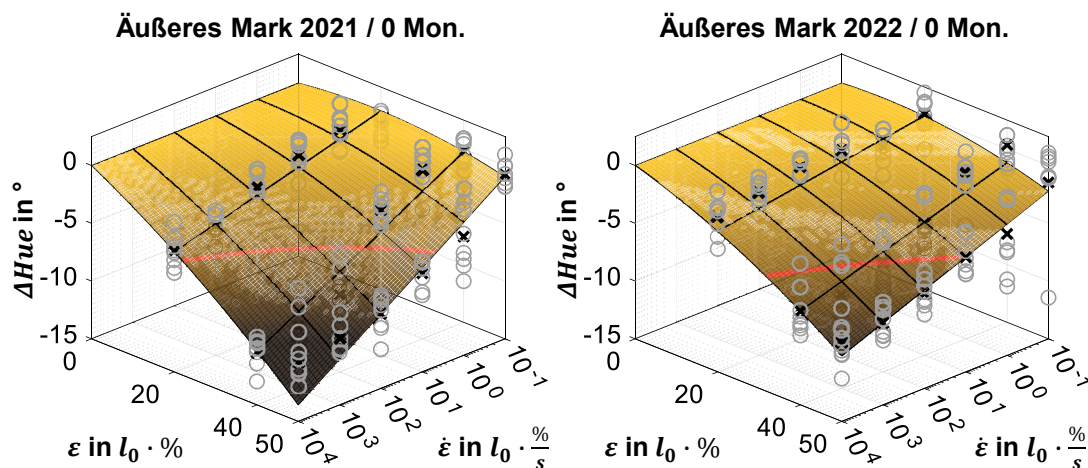


Abbildung 6: Verfärbungsempfindlichkeit des äußeren Marks erntefrischer Kartoffelknollen verschiedener Erntejahre

Zur Übertragung der Verfärbungsneigung in ein Diskrete-Elemente-Methode-Modell sind vor allem die Verfärbungsempfindlichkeiten des äußeren Marks relevant. Dies liegt zum einen an der höheren Schwarzfleckigkeitsempfindlichkeit und zum anderen am hohen Gesamtanteil des Gewebes an der Kartoffelknolle. In der folgenden Tabelle werden die Konstanten  $k_1$  und  $k_2$  der oben beschriebenen Verfärbungsfunktion für die untersuchten Gewebe des äußeren Marks der verschiedenen Lager- und Erntezeiträume gegenübergestellt (Tabelle 1). Der Koeffizient  $k_1$  gibt dabei den wesentlichen Trend der Verfärbungsfunktion vor. Erkennbar ist eine Abnahme der Verfärbungsneigung über die Lagerdauer sowie eine geringere Verfärbungsneigung der im Herbst 2022 geernteten Kartoffelknollen. Der Determinationskoeffizient  $R^2$  zeigt eine hohe bis sehr hohe Übereinstimmung der Verfärbungsfunktion mit den Versuchsdaten.

Tabelle 1: Werte der Verfärbungsfunktion zur Verfärbungsempfindlichkeit des äußeren Marks

Koeffizienten der Verfärbungsfunktion	Erntejahr/Lagerdauer			
	2021/0 Monate	2021/4 Monate	2021/8 Monate	2022/0 Monate
$k_1$	-1,4E-03	-5,1E-04	-1,8E-03	-1,5E-03
$k_2$	-5,0E-02	-4,3E-02	-1,3E-02	-3,8E-02
$R^2$	99%	86%	97%	92%

Zur Simulation der Schwarzfleckigkeit mit der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) kann im Folgenden die Verfärbungsfunktion als Schadensfunktion in ein erweitertes Kontaktmodell integriert werden. Durch eine Segmentierung der Partikel mit diskreten Abstufungen können lokale Schädigungen trotz eines globalen Partikelmodells registriert werden (Abbildung 7, mittig). Segmente mit einem berechneten Schädigungswert von  $\Delta Hue \leq -5^\circ$  werden nach den Erkenntnissen aus den Versuchen als geschädigt angenommen. Abbildung 7 zeigt ein Beispiel für die Schädigungsverteilung, die im Experiment (Abbildung 7, links) und im Simulationsmodell (Abbildung 7, rechts) ermittelt wurde. In



nachfolgenden Schritten muss das Schadensmodell durch den Vergleich von Schädigungen in Experimenten und Simulationen validiert werden.

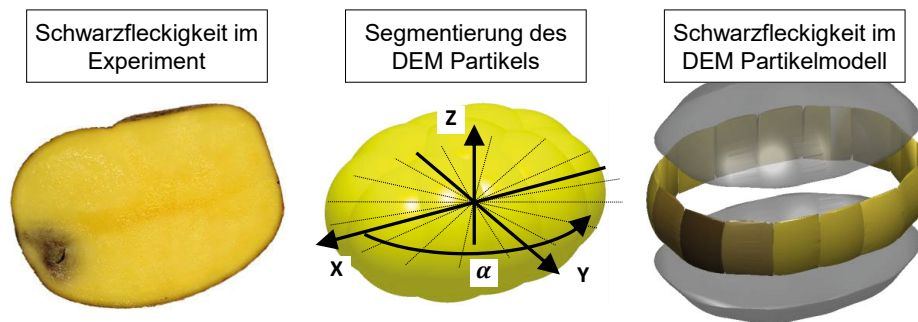


Abbildung 7: Schwarzfleckigkeit aufgrund mechanischer Belastung in Experimenten (links) und im Simulationsmodell (mittig und rechts)

## Schlussfolgerungen

Mit dem vorgestellten Prüfstand können Kartoffelgewebeprouben präzise belastet werden. Die erzeugte Schädigung kann mit der Prüfmethode und dem Messaufbau bestimmt werden. Die Kombination von hoher Stauchung und hoher Stauchrate zeigt die deutlichste Verfärbung. Das äußere Mark zeigt die höchste und das innere Mark die geringste Empfindlichkeit für Schwarzfleckigkeit, gemessen an der relativen Verfärbung. Durch längere Lagerung der Kartoffeln reduziert sich die Empfindlichkeit vermutlich aufgrund eines gesunkenen Turgors. Die Verfärbungsneigung der verschiedenen Knollengewebe wird signifikant vom Erntejahr und der Lagerdauer beeinflusst und kann jeweils mit entsprechenden Übertragungsfunktionen beschrieben werden. Mit der Segmentierung der Kartoffelpartikel in der DEM-Simulationsumgebung und der experimentell bestimmten Verfärbungsfunktion können lokale Schwarzfleckigkeitsschäden in der Simulation dargestellt werden. In weiteren Untersuchungen soll auch der Zusammenhang der Verfärbungsfunktion und der Knollenphysiologie intensiviert betrachtet werden.

## Literatur

- Bundessortenamt (2015): Beschreibende Sortenliste – Kartoffeln. Hannover, Bundessortenamt
- Coetzee, C. (2020): Calibration of the discrete element method: Strategies for spherical and non-spherical particles. *Powder Technology* 364, pp. 851–878, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.076>
- Cundall, P.A.; Strack, O. D. L. (1979): A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique* 9(1), pp. 47–65
- FAO (2021): Erntemenge von Kartoffeln weltweit in den Jahren 1990 bis 2020 (in Millionen Tonnen). [de.statista.com/statistik/daten/studie/929847/umfrage/erntemenge-von-kartoffeln-weltweit/](https://de.statista.com/statistik/daten/studie/929847/umfrage/erntemenge-von-kartoffeln-weltweit/), Zugriff am 12.09.2022
- Heinecke, A. (2007): Beitrag zur Ermittlung der biochemischen Ursachen der Schwarzfleckigkeit bei Kartoffeln. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen
- Hughes, J.C. (1980): Proceedings. Role of tuber properties in determining susceptibility of potatoes to damage. *Annals of Applied Biology* 96(3), pp. 344–345, <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1980.tb04785.x>
- Peters, R. (1999): Qualitätskartoffeln erzeugen – Beschädigungen vermeiden. Bonn, aid

Tijskens, E.; Ramon, H.; Baerdemaeker, J. de (2003): Discrete element modelling for process simulation in agriculture. *Journal of Sound and Vibration* 266(3), pp. 493–514, [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00581-9](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00581-9)

Wulkow, A. (2009): Die Neigung zu Schwarzfleckigkeit bei Kartoffeln (*Solanum tuberosum*) unter besonderer Berücksichtigung der Knollenphysiologie. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen

## Autoren

**Dipl.-Ing. Lukas Poppa** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und **Prof. Dr. Ludger Frerichs** ist Leiter des Instituts für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der Technischen Universität Braunschweig, Langer Kamp 19a, 38106 Braunschweig, E-Mail: l.poppa@tu-braunschweig.de

**Dr.-Ing. Jintian Liu** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und **Prof. Dr.-Ing. Markus Böl** ist Leiter des Instituts für Mechanik und Adaptronik der Technischen Universität Braunschweig, Langer Kamp 6, 38106 Braunschweig

## Danksagungen

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) - 436145430.

Die Versuchskartoffeln wurden mit freundlicher Unterstützung zur Verfügung gestellt von Gaus-Lütje GbR, Wasbüttel.

## Hinweis

Das Thema wurde auf der Konferenz AgEng-LAND.TECHNIK 2022, Berlin, 22.–23. November 2022, vorgestellt und eine Kurzfassung im VDI-Bericht Nr. 2406, S. 429–438, veröffentlicht.