

Lagerung von Kartoffelsorten für die industrielle Verarbeitung ohne CIPC

Margot Visse-Mansiaux^{1,2}, Maud Tallant¹, Fabien Curty³, Ruedi Schwärzel¹, Yves Brostaux² und Brice Dupuis¹

¹Agroscope, 1260 Nyon, Schweiz

²Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège, 5030 Gembloux, Belgien

³Fenaco, 3001 Bern, Schweiz

Auskünfte: Margot Visse-Mansiaux, margot.visse@agroscope.admin.ch und Brice Dupuis, brice.dupuis@agroscope.admin.ch

<https://doi.org/10.34776/afs11-175g> Publikationsdatum: 25. August 2021



Abb. 1 | Von Agroscope hergestellte automatisierte Versuchseinheit, die voneinander unabhängige Behandlungen der Kartoffeln in derselben Kühlkammer ermöglicht. (Foto: Margot Visse-Mansiaux, Agroscope)

Zusammenfassung

Chlorpropham (CIPC) war während Jahrzehnten das am häufigsten eingesetzte Keimhemmungsmittel bei der Lagerung von Kartoffeln. Im Januar 2020 wurde die Zulassung dieses Keimhemmungsmittels in der Europäischen Union nicht mehr verlängert. In der

Schweiz ist die Verwendung seit dem 30. September 2020 untersagt. Als Vorbereitung auf diese Situation hat Agroscope während fünf Jahren, von 2015 bis 2020, Versuche zu CIPC-Alternativen bei der Lagerung von Kartoffeln für die industrielle Verarbeitung durchgeführt. Während mindestens zwei aufeinanderfolgenden Jahren wurde die Wirksamkeit von fünf Substanzen zur Behandlung von Kartoffeln nach der Ernte geprüft: 1,4-Dimethylnaphthalin (1,4-DMN), 3-Decen-2-on, Ethylen alleine oder in Kombination mit 1-Methylcyclopropen (1-MCP), L-Carvon und Limonen. Ausserdem wurde die Wirksamkeit von Maleinsäurehydrazid (MH) untersucht; diese wurde jeweils im Feld auf die heranwachsenden Pflanzen gesprüht. Die Wirksamkeit der Maleinsäure wurde nach fünf bis sieben Monaten Lagerung geprüft und mit einer unbehandelten Kontrolle sowie mit der CIPC-Behandlung verglichen. Um im Versuch die Wirksamkeit von Ethylen alleine oder in Kombination mit 1-MCP zu prüfen, wurde der Gehalt an reduzierenden Zuckern gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass alle geprüften Substanzen keimhemmend wirken, allerdings mit unterschiedlicher Wirksamkeit je nach Wirkstoff und Versuchsbedingungen. Die Wirksamkeit bestimmter Substanzen (MH und Ethylen) ist je nach Sorte unterschiedlich. Wir stellten auch fest, dass mit 1-MCP ein durch Ethylen verursachter Anstieg der reduzierenden Zucker verhindert werden konnte. Im Allgemeinen sind die geprüften Wirkstoffe weniger effizient als CIPC. Deren Anwendung sollte also mit innovativen Lagerungsmethoden kombiniert werden, um die doppelte Herausforderung zu erfüllen: Kartoffeln während mehreren Monaten ohne Keimung zu lagern und die Bildung reduzierender Zucker zu verhindern.

Key words: potatoes, sprouting, maleic hydrazide, essential oils, synthetic molecules.

Einleitung

Chlorpropham (CIPC) ist ein weltweit seit Jahrzehnten eingesetztes Keimhemmungsmittel für die Lagerung von Kartoffeln über mehrere Monate (Paul *et al.* 2016). In der Europäischen Union (EU) und der Schweiz wird der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln wegen gesundheitlicher Bedenken und aus ökologischen Gründen immer mehr eingeschränkt. Vor diesem Hintergrund war das Ende der CIPC-Anwendung absehbar. So trat in der EU der Entscheid, die Zulassung dieses Keimhemmungsmittels nicht mehr zu erneuern, im Januar 2020 in Kraft (EU regulation 2019). Die Verwendung von CIPC-Lagerbeständen wurde schrittweise untersagt. In einigen europäischen Ländern, wie z.B. Belgien, ist dies bereits der Fall (Martin 2020a). In der Schweiz waren Verkäufe von CIPC noch bis zum 15. August 2020 erlaubt, und als Enddatum für die Verwendung von Lagerbeständen wurde der 30. September 2020 festgelegt (OFAG 2020). Damit wird die Lagersaison 2020–2021 in den meisten europäischen Ländern ohne CIPC-Anwendung stattfinden. In der Schweiz konnten die Kartoffeln im September 2020 theoretisch noch mit CIPC behandelt werden, es wurde jedoch aufgrund der hohen Persistenz dieses Wirkstoffs davon abgeraten, um Probleme mit Rückständen in den Knollen und in den Lagerzellen zu vermeiden. Auch wenn der Rückstandshöchstgehalt (RHG) für CIPC in der EU gegenwärtig unverändert bleibt (RHG = 10 mg kg⁻¹) (European Commission 2019), dürfte dieser rasch angepasst werden. Im Herbst 2020 wurde über den maximalen RHG-Wert von 0,4 mg kg⁻¹ beraten. Dieser dürfte ab Sommer 2021 in Kraft treten. Dieser vorübergehende RHG dürfte später weiter reduziert werden (Martin 2020a). In der Schweiz beschloss das Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen (BLV), dass der aktuelle RHG von 30 mg kg⁻¹ bis zum 1. Juli 2021 gültig bleibt und anschliessend auf 10 mg kg⁻¹ gesenkt wird. Wie in der EU sollte ein vorläufiger RHG auch in der Schweiz schliesslich bei 0,4 mg kg⁻¹ festgelegt werden. Der Zeitpunkt der Anpassung des Werts in der Schweiz ist allerdings noch unbekannt (Swisspatat 2020). CIPC ist ein Wirkstoff mit hoher Persistenz, der langfristig in den Anlagen verbleibt: im Beton der Lagerzellen, aber auch im Belüftungssystem (Douglas *et al.* 2018; Martin 2020b). Aus diesem Grund ist es wichtig, die Risiken im Zusammenhang mit der Persistenz dieser Substanz richtig einzuschätzen. Die erste Massnahme ist ein Verzicht auf die Anwendung von CIPC und die zweite Massnahme ist die Reinigung der Lagerzellen, um einen möglichst grossen Teil der Rückstände der Behandlungen aus früheren Jahren zu reduzieren.

Durch das Verbot der CIPC-Anwendung besteht die dringende Notwendigkeit, neue Lösungen für die Keimhemmung zu finden. Es werden weltweit bereits verschiedene Alternativen zu CIPC für die Behandlung nach der Ernte angeboten. Dazu gehören:

1,4-Dimethylnaphthalin (1,4-DMN)

1,4-DMN ist ein in Kartoffeln natürlicherweise vorkommendes Pflanzenhormon (Campbell *et al.* 2012). Es wird für die Anwendung als Keimhemmungsmittel synthetisch hergestellt. 1,4-DMN ist bereits in zehn europäischen Ländern sowie den USA, Kanada, Neuseeland, Mexiko und Kenia zugelassen (Jina 2020). In der Schweiz wird es demnächst zugelassen werden (BLW 2020). Der RHG für 1,4-DMN in Kartoffeln ist in der EU (European Commission 2019) sowie in der Schweiz (BLV 2020) bei 15 mg kg⁻¹ festgelegt.

3-Decen-2-on

3-Decen-2-on ist eine natürliche biochemische Verbindung (EPA 2013), die in bestimmten Pilzarten der Gattung *Boletus* vorkommt und in der EU als Lebensmittelzusatz bewilligt ist. Dieses Molekül wird chemisch hergestellt und ist als Keimhemmungsmittel in den USA, Kanada und Israel zugelassen. 3-Decen-2-on sollte in der EU im Jahr 2022 zugelassen werden (Immaraju 2018).

Ethylen

Ethylen ist ein, in vielen Früchten und Gemüsen vorkommendes, natürliches Hormon. Diese Substanz ist als Keimhemmungsmittel mit verschiedenen Anwendungsarten zugelassen.

Erstens: mit dem sogenannten «Biofresh Safestore»-System werden 99,95 % reines Ethylen in Druckflaschen eingesetzt. Der Ethylengehalt in der Lagerzelle wird kontrolliert mit Hilfe der Biofresh-Kontrolleinheit (EMU) und das Ethylen nach Bedarf freigesetzt (BioFresh 2020). Dieses System wird von der Firma Biofresh (Biofresh Group Ltd.) angeboten und ist in sechs europäischen Ländern, in den USA und in Japan zugelassen (Caisley 2020).

Zweitens: mit einem Generator wird direkt in der Lagerzelle Ethanol in Ethylen umwandelt. Dieses System wird von der Firma Restrain[®] Company Ltd angeboten. Das System Restrain[®] ist ebenfalls in vielen Ländern Europas und namentlich in der Schweiz zugelassen, wo es durch die Firma Netagco (Netagco Schweiz GmbH) vertrieben wird.

L-Carvon

L-Carvon ist ein wichtiger Bestandteil von ätherischem Minzeöl und als Keimhemmungsmittel in 18 europäischen Ländern (auch in der Schweiz) sowie in den USA zugelassen (De Barbeyrac 2020).

Limonen

Ätherisches Orangenöl, dessen Hauptbestandteil Limonen ist, wurde kürzlich in den Niederlanden als Keimhemmungsmittel zugelassen (Bonnet 2020).

Maleinsäurehydrazid (MH)

Ein Produkt auf der Grundlage des Wirkstoffs Maleinsäurehydrazid, das während der Vegetationsperiode angewendet wird, ist ebenfalls in vielen Ländern verfügbar, namentlich in der Schweiz. Es bewirkt eine verzögerte Keimung bei der Lagerung (Caldiz *et al.* 2001). Diese Substanz ist altbewährt, geht doch ihre erste Zulassung zurück auf die späten 1940er-Jahre (Schoene und Hoffmann 1949).

Ziel dieser Forschungsarbeit war es, alle möglichen Alternativen zur CIPC-Behandlung für die Keimhemmung von Kartoffeln und die Bewahrung der Qualität der Ware während der Lagerung zu prüfen. Die Wirksamkeit der oben aufgeführten Keimhemmungsmittel wurde wie folgt geprüft: einerseits unter Versuchsbedingungen (200 kg Kartoffeln) und andererseits unter halb-industriellen Bedingungen (fünf Tonnen) oder bei industriellen Bedingungen (> 300 Tonnen). Die Versuche wurden bei Agroscope und/oder bei unserem Partner Fenaco durchgeführt.

Material und Methoden**Keimhemmende Behandlung im Feld****Maleinsäurehydrazid (MH)**

Wir haben die Entwicklung der Wirksamkeit von Maleinsäurehydrazid (MH) bezüglich der Keimhemmung während einer Lagerung über einen Zeitraum von sieben Monaten verfolgt. Die Wirksamkeit von MH wurde mit einer unbehandelten Kontrolle und einer CIPC-Behandlung verglichen. Die Keimung (Gewicht der Keime von 25 Knollen) wurde bei drei und fünf Monaten Lagerung bei 8°C sowie bei sieben Monaten Lagerung nach einer progressiven Erhöhung der Temperatur um 1°C pro Woche bis auf eine Temperatur von 15°C nach sieben Monaten gemessen. Es wurden neun Sorten getestet: Agria, Bintje, Fontane, Innovator, Lady Claire, Markies, Panda, Pirol und Verdi während zwei aufeinanderfolgenden

Versuchszeiträumen (2016–2017 und 2017–2018). Die behandelten Knollen (pro Keimhemnungsmittel 100 kg Kartoffeln) und die Knollen der Kontrolle (100 kg) wurden in einem Kühlraum bei 8°C und 80 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert.

Die Behandlung im Feld mit Maleinsäure wurde gemäss den Herstellerangaben angewendet (Tab. 1).

Keimhemmende Behandlung bei der Lagerung**1,4-DMN und 3-Decen-2-on**

Die Wirksamkeit von 1,4-DMN und 3-Decen-2-on wurde in von Agroscope entwickelten Versuchskammern für 200 kg Kartoffeln und mit kontrollierbarer CO₂-Konzentration getestet. Die Versuchskammern wurden in einem speziellen Kühlraum mit 8°C und 80 % relativer Luftfeuchtigkeit platziert. Dadurch konnten die Wirkstoffe bei identischen Bedingungen bezüglich Temperatur und Luftfeuchtigkeit getestet werden (Abb. 1).

Die beiden Wirkstoffe wurden bei neun Sorten getestet: Agria, Bintje, Fontane, Innovator, Lady Claire, Markies, Panda, Pirol und Verdi während zwei aufeinanderfolgenden Versuchszeiträumen (2016–2017 und 2017–2018). Um die Wirksamkeit der Substanzen zu bestimmen, wurde die Keimung (Gewicht der Keime von 25 Knollen) nach drei und fünf Monaten Lagerung bei 8°C bei den behandelten Knollen bzw. den unbehandelten Knollen der Kontrolle bestimmt. Die Wirksamkeit von 1,4-DMN und 3-Decen-2-on bezüglich der Keimhemmung wurde mit der Wirksamkeit von CIPC und mit der unbehandelten Kontrolle verglichen.

Die Wirkstoffe wurden gemäss den Herstellerangaben angewendet (Tab. 1).

Ethylen alleine oder in Kombination mit 1-MCP

Es wurde die keimhemmende Wirkung (Gewicht der Keime von 25 Knollen) von Ethylen alleine oder in Kombination mit 1-MCP (Handelsname: SmartFresh™) untersucht. Diese Tests fanden unter denselben Versuchsbedingungen statt wie für 1,4-DMN und 3-Decen-2-on. Die Wirkung wurde mit einer unbehandelten Kontrolle und mit der CIPC-Behandlung verglichen. Die Kammern für die Kontrolle bzw. für die mit CIPC behandelten Knollen wurden in einem anderen Kühlraum platziert als die Kammern mit den Behandlungen «Ethylen» bzw. «Ethylen + 1-MCP». Das Ethylen wurde im Kühlraum mit Hilfe des Systems Restrain® (Restrain® Company Ltd.) versprüht, das die Ethylen-Konzentration (nach progressiver Erhöhung) gleichmässig bei 10 ppm hält. Da der Ethylen-Generator nicht direkt in den Versuchseinheiten platziert wurde und der Luftaustausch mit dem Kühlraum nicht absolut konstant war, war die Ethylen-

Tab. 1 | Informationen zur Anwendung der geprüften Wirkstoffe für die Schweiz (*Informationen ohne Gewähr; andere Lieferanten, Dosierungen oder Anwendungsmethoden sind möglich).

Handelsname der verwendeten Produkte	Substanz (Wirkstoff)	Wirkungsweise	Vertrieb des Produkts in der Schweiz*	Anzuwendende Menge*	Häufigkeit der Anwendung*	Zeitpunkt der ersten Anwendung*	Anwendungsmodalitäten in unseren Versuchen	Wartezeit nach der Anwendung des Produkts*	Anwendungsmethode
Fazor®	Maleinsäurehydrazid 60 %	Hemmt die Zellteilung (unter anderem)	Arysta Life-Science Switzerland Särl	5 kg/ha	einmalige Behandlung	Knollengrösse über 25–30 mm	Wenn Knollen > 25 mm (1 Behandlung)	–	Flüssigkeitszerstäuber
Smart-Block®	3-Decen-2-on 98 %	Kurativ: Nekrose durch Zerstörung der internen Zellstruktur der Keime	Noch nicht zugelassen	100 ml/t	Anwendung, wenn die Keime eine Grösse von 3 mm erreichen (maximal 4 Behandlungen)	Wenn Keime 3 mm Grösse erreichen	Ende November oder Dezember je nach Versuch (4 Behandlungen)	Unbekannt, da in Europa nicht zugelassen	Heissvernebler
Dormir®	1,4-DMN 98 %	Präventiv: verlängert die Keimruhe der Kartoffeln	AGROLINE (Fenaco**)	10 bis 20 ml/t (n)	Alle 6 Wochen (maximal 120 ml über die Saison)	Ab Beginn der Lagerung möglich	Mitte Oktober (Behandlungen alle 6 Wochen)	30 Tage (EU)	Heissvernebler
Neo-Stop Starter®	Chlorpropham 300 g/l	Hemmt die Zellteilung	Arysta Life-Science Switzerland Särl	60 ml/t	Einmalige Behandlung bei der flüssigen Anwendung	Bei Beginn der Lagerung	Mitte Oktober (1 Behandlung)	Vier Wochen nach der letzten Behandlung	Flüssigkeitszerstäubung***
Argos®	Limonen 843,2 g/l	Präventiv und kurativ (Nekrose)	Noch nicht zugelassen	100 ml/t	Alle 3 Wochen	1 Monat nach Beginn der Lagerung	Unterschiedlich, von Mitte Oktober bis Mitte November je nach Versuch (Behandlung alle 3 Wochen)	Keine Frist	Heissvernebler (190 °C)***
Biox-M®	L-Carvon 65–85 %	Präventiv und kurativ (Nekrose)	Andermatt Biocontrol SA	90 ml/t (1. Behandlung), dann 30 bis 45 ml/t	Alle 3 Wochen (30 ml/t) oder 4 Wochen (45 ml/t) und maximal 360 ml/t insgesamt	6 bis 20 Tage nach der Ernte	Unterschiedlich, von Mitte Oktober bis Mitte November je nach Versuch (Behandlung alle 3 Wochen)	Keine Frist	Heissvernebler (180–190 °C) ***
Ethylen	Ethylen	Präventiv: verlangsamt das Erscheinen der Keime und deren Längenwachstum	Netagco Schweiz GmbH	stufenweise Erhöhung, dann kontinuierlich 10 ppm	Kontinuierlich	Bei Beginn der Lagerung	Ab Beginn der Lagerung (Restrainer® Generator)	Keine Frist	Restrainer® Generator

**Das Produkt Dormir® wurde in der Schweiz im September 2020 zugelassen und wird durch die neu von Fenaco lancierte Marke AGROLINE vertrieben (<https://www.agroline.ch>).

***Es bestehen weitere Anwendungsmethoden. Weitere Informationen sind bei den Lieferanten verfügbar.

Konzentration in den Versuchs-Einheiten variabel und lag bei höchstens 10 ppm oder darunter. 1-MCP wurde Ende Oktober angewendet und danach monatlich ein Mal. Dazu wurden 2 g Pulver des Produkts SmartFresh™ in 20 ml destilliertem Wasser gelöst. Im Wasser gelöst produziert 1-MCP ein Gas, das sich im Lagerraum verteilt. Wir hielten uns an die empfohlene Dosis der Publikation von Prange *et al.* (2005), in der 1-MCP mit dem Produkt EthylBloc® angewendet wird, wobei wir das Volumen unserer Versuchskammern berücksichtigten, um mit dem in unserer Studie verwendeten SmartFresh™ dieselbe Dosis (ungefähr 0,9 µl.l⁻¹) zu erreichen.

Ausserdem wurde die Wirkung dieser Substanz auf den Zuckergehalt der Kartoffeln untersucht. Die Analysen zum Gehalt an reduzierenden Zuckern (Glucose + Fructose) wurden von unserem Partner Zweifel (ein Schweizer Chips-Hersteller) bei vier Sorten (Markies, Agria, Verdi und Lady Claire) nach drei und fünf Monaten Lagerung in zwei aufeinanderfolgenden Jahren (2015–2016 bzw. 2016–2017) vorgenommen.

Der Wirkstoff 1-MCP wurde gemäss den Herstellerangaben angewendet (Tab. 1). Da dieses Produkt nicht für Kartoffeln zugelassen ist, wird es in Tabelle 1 nicht berücksichtigt.

Ätherische Öle

Die Wirksamkeit von ätherischem Minze- und Orangenöl (L-Carvon bzw. Limonen) wurde nach drei Monaten und nach fünf Monaten Lagerung während zwei Versuchsjahren bei drei Sorten (Agria, Verdi und Innovator) untersucht. In einem ersten Jahr erfolgte der Versuch unter halb-industriellen Bedingungen (fünf Tonnen, Jahr 2017–2018) und in einem zweiten Jahr unter industriellen Bedingungen (>300 Tonnen, Jahr 2018–2019). Die Knollen der verschiedenen Sorten stammten aus derselben Parzelle, ausser die Knollen der Kontrolle für das Jahr 2017–2018, die aus zwei verschiedenen Parzellen kamen.

Der Wirkstoff wurde gemäss den Herstellerangaben angewendet (Tab. 1).

Versuchsdesign und statistische Analysen

Für die statistischen Analysen wurde das Programm R Version 3.6.3 (R Core Team 2019) verwendet. Für den Versuch mit der Behandlung im Feld wurde ein gemischtes lineares Modell angewendet mit den festen Faktoren «Sorte» und «Substanz» sowie dem wiederholten Faktor «Beobachtungsdatum». Das Jahr wird als zufälliger Faktor betrachtet. Für die Versuche nach der Ernte wurde ein gemischtes lineares Modell mit den festen Faktoren «Sorte» und «Substanz» sowie dem zufälligen Faktor «Jahr» angewendet. Für diese Versuche wurden die statistischen Analysen für die Beobachtungen nach drei bzw. fünf Monaten Lagerung getrennt vorgenommen. Die erwähnten Modelle wurden mit der Funktion «lmer» des Pakets «lme4» von R konstruiert (Bates et al.

2015). Bei den verschiedenen Modellen wurde der zufällige Faktor «Jahr» weggelassen, weil er nicht signifikant war. Die verschiedenen Modelle wurden mit der Funktion «Anova» des Pakets «car» Version 3.0-7 von R analysiert, die als Signifikanztest für lineare gemischte Modelle den Chi-Quadrat-Test (Fox and Weisberg 2019) bzw. den F-Test für lineare Modelle ohne zufälligen Faktor verwendet. Falls erforderlich wurden die Variablen im Hinblick auf Normalverteilung und Varianzhomogenität logarithmisch transformiert ($x + 1$). Ein Mehrfachvergleichstest (Tukey HSD mit der Methode von «emmeans») wurde bei den Faktoren und Interaktionen mit signifikantem Effekt mit Hilfe des Pakets «emmeans» von R (Lenth 2020) durchgeführt. Das Signifikanzniveau wurde für alle statistischen Tests bei 5 % festgelegt.

Resultate und Diskussion

Die Ergebnisse der Signifikanztests, welche die Wirkung der Faktoren «Behandlung», «Sorte» und «Beobachtungszeitraum» sowie die Wirkung der Interaktionen zwischen den verschiedenen Faktoren zeigen, sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Keimhemmende Behandlung im Feld

Maleinsäurehydrazid (MH)

Die Wirksamkeit der Behandlungen war je nach Beobachtungszeitraum und Sorte unterschiedlich (Tab. 2). Deshalb untersuchten wir die Wirkung der Behandlungen für jeden Beobachtungszeitraum und jede Sorte getrennt (Abb. 2).

Tab. 2 | *p*-Werte aus den Signifikanztests (je nach Versuch Chi-Quadrat-Test oder F-Test) zu den Wirkungen der verschiedenen Faktoren und ihrer Interaktionen; Statistiken zu zwei Versuchsjahren; *statistisch unterschiedlich; NA = nicht analysiert.

Faktoren	Zeitraum	<i>P</i> -Werte für die Versuche mit verschiedenen Behandlungen:				
		Wirkung auf die Keimung (Gewicht der Keime von 25 Knollen in g)			Wirkung auf die reduz. Zucker	
		MH, CIPC, Kontrolle	1,4-DMN, 3-Decen- 2-on, CIPC, Kontrolle	Ethylen, Ethylen + 1-MCP, CIPC, Kontrolle	L-Carvon, Limonen, Kontrolle	Ethylen, Ethylen + 1-MCP, CIPC, Kontrolle
Behandlung	3 Monate	$p < 0,001^*$	$p < 0,001^*$	$p < 0,001^*$	$p < 0,001^*$	$p < 0,001^*$
	5 Monate		$p < 0,001^*$	$p < 0,001^*$	$p < 0,001^*$	NA
Sorte	3 Monate	$p < 0,001^*$	$p < 0,001^*$	$p < 0,001^*$	$> 0,05$	$p < 0,001^*$
	5 Monate		$p < 0,01^*$	$> 0,05$	$> 0,05$	NA
Behandlung × Sorte	3 Monate	$p < 0,001^*$	$> 0,05$	$p < 0,05^*$	$> 0,05$	$p < 0,01^*$
	5 Monate		$> 0,05$	$> 0,05$	$> 0,05$	NA
Beobachtungszeitraum	–	$p < 0,001^*$	NA	NA	NA	NA
Beobachtungszeitraum × Behandlung	–	$p < 0,001^*$	NA	NA	NA	NA
Beobachtungszeitraum × Sorte	–	$p > 0,05$	NA	NA	NA	NA

Bei den *p*-Werten in den nachfolgenden Abschnitten handelt es sich um die *p*-Werte aus den Tukey-Tests.

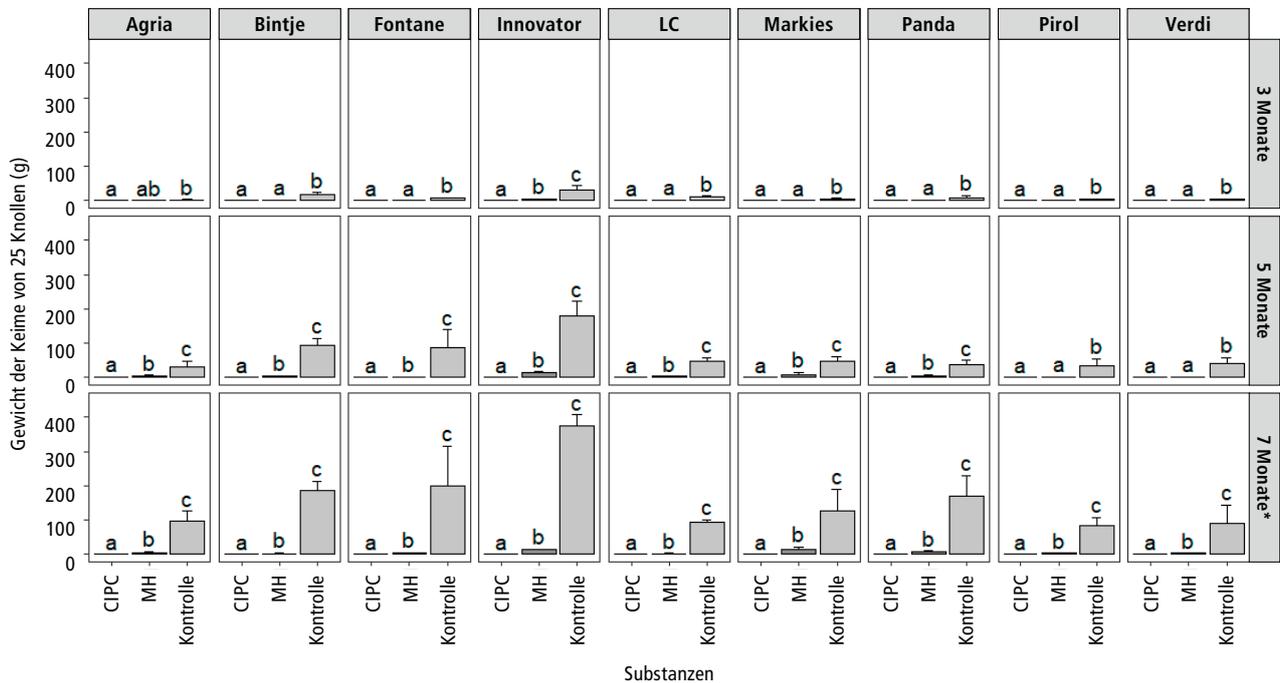


Abb. 2 | Gewicht der Keime von 25 Knollen nach der Behandlung mit Maleinsäurehydrazid (MH) bzw. CIPC sowie von Knollen der unbehandelten Kontrolle nach drei und fünf Monaten Lagerung bei 8°C und nach sieben Monaten Lagerung (*sieben Monate Lagerung mit stufenweiser Erhöhung der Temperatur von 8 bis auf 15°C im siebten Monat) für die neun getesteten Sorten während zwei Versuchsjahren bei kontrollierten Versuchsbedingungen (200 kg Kartoffeln) (Mittelwert ± Standardfehler). Bei Mittelwerten, die nicht mit einem identischen Buchstaben gekennzeichnet sind, ist der Unterschied gemäss Tukey-Test signifikant.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit MH im Vergleich zur Kontrolle eine gute Keimhemmung bei bis zu sieben Monaten Lagerung mit einer Temperaturerhöhung von 8 bis 15°C erreicht wird. Nach drei Monaten Lagerung bei 8°C ist die Wirkung bei den meisten Sorten mit der Wirkung von CIPC vergleichbar. Nach fünf Monaten Lagerung bei 8°C ist CIPC bei den meisten Sorten wirksamer als MH. Nach sieben Monaten Lagerung bei einer progressiven Temperaturerhöhung ist CIPC bei allen getesteten Sorten wirksamer als MH.

Nach drei Monaten Lagerung ist das Gewicht der Keime sowohl bei der CIPC- als auch bei der MH-Behandlung bei den Sorten Bintje, Fontane, Lady Claire, Markies, Panda, Pirol und Verdi signifikant tiefer als bei der unbehandelten Kontrolle ($p < 0,05$). Bei der Sorte Innovator bewirkten ebenfalls beide Substanzen eine signifikante Keimhemmung im Vergleich zur Kontrolle ($p < 0,001$), CIPC war jedoch im Vergleich zu MH wirksamer ($p < 0,001$). Bei der Sorte Agria wurde gegenüber der Kontrolle eine signifikante, jedoch schwache Keimhemmung durch die CIPC-Behandlung beobachtet ($p = 0,046$) und eine geringfügige signifikante Keimhemmung bei den Knollen von Pflanzen, die mit MH behandelt worden waren ($p = 0,050$) (Abb. 2).

Nach fünf Monaten Lagerung lag das Gewicht der Keime bei den Sorten Pirol und Verdi bei der CIPC- ebenso wie bei der MH-Behandlung signifikant tiefer als bei der unbehandelten Kontrolle ($p < 0,001$). Bei den übrigen sieben Sorten bewirkten sowohl CIPC als auch MH gegenüber der nicht behandelten Kontrolle eine Keimhemmung ($p < 0,001$), aber das Gewicht der Keime lag bei den mit CIPC behandelten Knollen durchgehend tiefer als bei Knollen von Pflanzen, die MH behandelt worden waren ($p < 0,05$) (Abb. 2).

Schliesslich beobachteten wir nach sieben Monaten Lagerung und nach einer stufenweisen Temperaturerhöhung auf 15°C bei allen neun Sorten eine Keimhemmung durch CIPC und MH im Vergleich zur Kontrolle ($p < 0,001$), wobei die Keimhemmungswirkung durch MH bei allen Sorten signifikant geringer war als durch CIPC ($p < 0,05$).

Keimhemmende Behandlung bei der Lagerung

1,4-DMN und 3-Decen-2-on

Mit den Wirkstoffen 1,4-DMN und 3-Decen-2-on ist eine wirksame Keimhemmung während mindestens fünf Monaten Lagerung im Vergleich zur unbehandelten Kont-

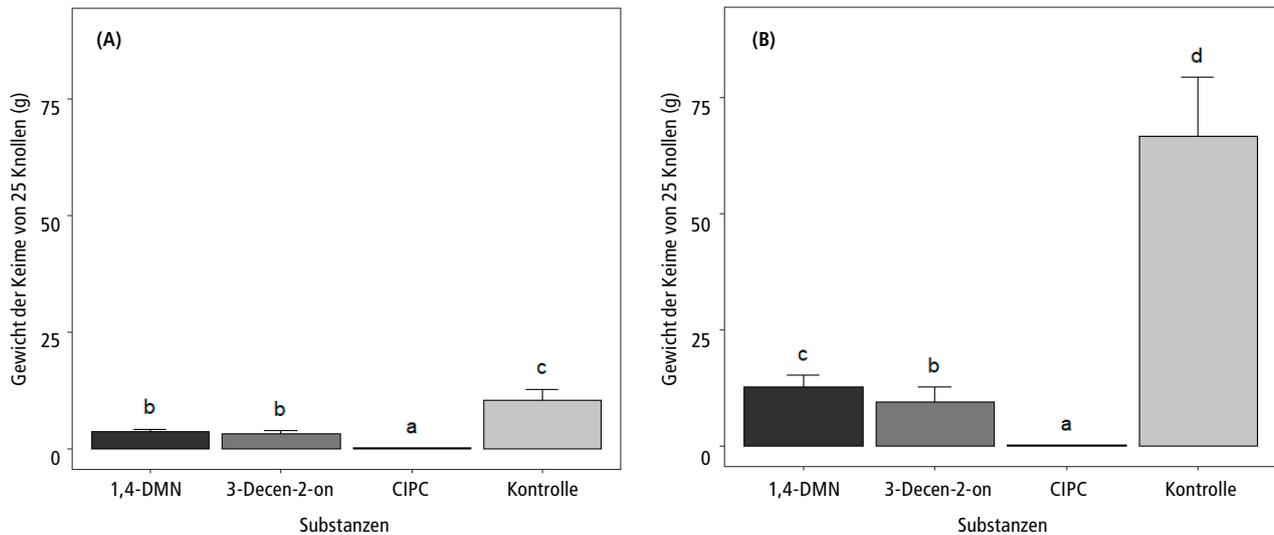


Abb. 3 | Wirksamkeit der Substanzen 1,4-DMN und 3-Decen-2-on bei drei Monaten (A) und fünf Monaten (B) Lagerung während zwei Versuchsjahren und bei kontrollierten Versuchsbedingungen (200 kg Kartoffeln) für neun untersuchte Sorten (Mittelwert \pm Standardfehler). Bei Mittelwerten, die nicht mit einem identischen Buchstaben gekennzeichnet sind, ist der Unterschied gemäss Tukey-Test signifikant.

rolle möglich ($p < 0,001$). Nach drei Monaten Lagerung ist die Wirksamkeit der beiden Substanzen gleich, bei fünf Monaten Lagerung erwies sich dagegen 3-Decen-2-on als wirksamer als 1,4-DMN ($p < 0,01$). In beiden Beobachtungszeiträumen war allerdings die Wirksamkeit beider Substanzen geringer als diejenige von CIPC ($p < 0,001$; Abb. 3).

Der Wirkstoff 3-Decen-2-on hat eine kurative Wirkung. So stellten wir fest, dass dieser Wirkstoff bei den Keimen innerhalb von 24 Stunden nach der Behandlung eine Nekrose und vollständige Austrocknung verursacht (Abb. 4), was das geringere Gewicht der Keime nach der Behandlung der Knollen mit 3-Decen-2-on im Vergleich zur Behandlung mit 1,4-DMN nach fünf Monaten Lagerung erklärt. Die durch 3-Decen-2-on verursachten Nekrosen und Austrocknung der Keime nach 24 bis 36 Stunden wurde bereits in der Literatur beschrieben (Immaraju 2020; Knowles und Knowles 2015a, b). Ein Vorteil von 3-Decen-2-on ist damit, dass aufgrund der kurativen Wirkung eine bei der Lagerung bereits eingetretene Keimung behoben werden kann. Dieser Wirkstoff zerstört die interne Struktur der Zellen der Keime und das Gewebe nekrotisiert und trocknet vollständig bis zur Basis der Keime aus. 3-Decen-2-on wirkt sehr gut, wenn es auf Keime geringer Grösse (< 3 mm) gesprüht wird. Es ist noch wirksamer, wenn es bei den ersten Zeichen, die auf ein Ende der Keimruhe deuten (Keime im Stadium «weisser Punkt»), angewendet wird, da der Wirkstoff über die Dämpfe ins Innere der Keime dringen kann und die sich entwickelnden Meristeme abtötet (Immaraju 2018, 2020). In unserem Versuch wird

die Wirksamkeit dieses Produkts daher bei bestimmten Sorten wahrscheinlich unterschätzt, da in derselben Versuchskammer verschiedene Sorten mit unterschiedlicher Zeitdauer der Keimruhe gleichzeitig behandelt wurden. Bei bestimmten Sorten mit weiter fortgeschrittener Keimung hätten die Behandlungen früher durchgeführt werden müssen, um eine bessere kurative Behandlung zu erreichen. Bei einer vollständigen Lagersaison (sieben bis acht Monate) ist die Anzahl erforderlicher Behandlungen mit 3-Decen-2-on je nach Sorte und Temperatur unterschiedlich. Bei Sorten mit langer Keimruhe sind bei niedrigen Lagerungstemperaturen im Allgemeinen eine bis zwei Behandlungen erforderlich, drei bis vier Behandlungen dagegen bei Sorten mit kurzer Keimruhe und höherer Lagerungstemperatur (Immaraju 2018).

Ethylen alleine oder in Kombination mit 1-MCP

Bei einer Behandlung mit Ethylen alleine oder in Kombination mit 1-MCP wird die Keimung im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle bei einer Lagerung während bis zu fünf Monaten reduziert ($p < 0,05$; Daten nicht dargestellt).

Sowohl nach drei als auch nach fünf Monaten Lagerung lag das Gewicht der Keime nach einer Behandlung mit CIPC, mit Ethylen bzw. mit der Kombination Ethylen + 1-MCP signifikant tiefer als bei der unbehandelten Kontrolle ($p < 0,001$, $p < 0,05$ bzw. $p < 0,05$).

Ausserdem ist zu beachten, dass die Wirksamkeit von Ethylen, alleine oder in Kombination mit 1-MCP angewendet, in unseren Versuchen vermutlich unterschätzt wurde, weil unsere Versuchsanordnung keine konstante



Abb. 4 | Mit 3-Decen-2-on behandelte Knollen der Sorte Verdi nach fünf Monaten Lagerung unter den Versuchsbedingungen. Es lässt sich eine Nekrose und vollständige Austrocknung der Keime feststellen. (Foto: Carole Parodi, Agroscope)

Ethylen-Konzentration ermöglichte, wie dies für diese Substanz normalerweise empfohlen wird. Aus diesem Grund haben wir entschieden, die mit Ethylen erzielten Ergebnisse zur Wirksamkeit in diesem Artikel nicht darzustellen. Wir stellten jedoch fest, dass die Wirksamkeit je nach Sorte unterschiedlich ist. So war bei der Sorte Markies ein langsames Fortschreiten der Keimung im Vergleich zu den drei anderen untersuchten Sorten festzustellen. Dieser Unterschied der Wirksamkeit bei verschiedenen Sorten wurde auch in anderen Versuchen festgestellt. Fleisch und Martin (2019) beobachteten ebenfalls eine hervorragende Keimhemmung durch Ethylen bei der Lagerung der Sorte Markies, eine weniger gute Hemmung bei den Sorten Agria, Fontane und Challenger, und eine noch geringere Wirksamkeit bei der Sorte Innovator.

Wir analysierten auch den Gehalt an reduzierenden Zuckern in den Knollen nach der Behandlung mit den verschiedenen Substanzen wie auch in den Knollen der unbehandelten Kontrolle nach drei bzw. fünf Monaten Lagerung bei 8°C. Da die mit Ethylen behandelten Knollen bei unserer Versuchsanordnung unterschiedlichen Konzentrationen des Wirkstoffs ausgesetzt waren, die unter oder bei der empfohlenen Dosis (10 ppm) lagen, ist es möglich, dass die Wirkung von Ethylen, den Gehalt an reduzierenden Zuckern in den Knollen zu erhöhen, in unserer Studie unterschätzt wird. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt. Die statistischen Analysen wurden nur bei den nach drei Monaten Lagerung gesammelten Daten durchgeführt. Dabei wurden die Ergebnisse zu allen getesteten Substanzen und allen untersuchten

Sorten für zwei aufeinanderfolgende Versuchsjahre berücksichtigt (Tab. 4).

In Übereinstimmung mit der Literatur (Harper und Stroud 2018) zeigte unsere Studie, dass die Wirkung von Ethylen auf den Gehalt reduzierender Zucker von der Sorte abhängt (Tab. 2). Wir untersuchten die Wirkung von Ethylen auf den Gehalt an Zuckern nach drei Monaten Lagerung und für die einzelnen Sorten (Tab. 4). Unsere Ergebnisse zeigten, dass die Sorten Lady Claire und Verdi gegenüber einer durch Ethylen ausgelösten Zuckerbildung relativ unempfindlich sind, die Sorten Agria und Markies dagegen empfindlich. Unsere Studie zeigte, dass mit 1-MCP die durch Ethylen verursachte Zuckerbildung der Kartoffeln begrenzt werden kann. Unsere Ergebnisse decken sich der Studie von Prange *et al.* (2005), in der gezeigt wird, dass 1-MCP zur Begrenzung der durch Ethylen verursachten braunen Verfärbung beim Frittieren eingesetzt werden kann, ohne die keimhemmende Wirkung von Ethylen zu beeinträchtigen.

Nach drei Monaten Lagerung wurde bei den Sorten Lady Claire und Verdi festgestellt, dass der Gehalt an reduzierenden Zuckern tief ist und kaum von der untersuchten Substanz abhängt, während der Gehalt reduzierender Zucker bei den Sorten Agria und Markies je nach Behandlung unterschiedlich ist (Tab. 4). Bei der Sorte Agria ist der Gehalt an reduzierenden Zuckern signifikant höher in den Knollen, die unter mit Ethylen angereicherter Atmosphäre gelagert werden (Mittelwert 1,97 g kg⁻¹), im Vergleich zu Knollen, die mit Ethylen + 1-MCP behandelt wurden (Mittelwert 0,72 g kg⁻¹) und im Vergleich zu den Knollen der Kontrolle (Mittelwert

0,29 g kg⁻¹). Der Unterschied zum Gehalt in den mit CIPC behandelten Knollen (Mittelwert 1,18 g kg⁻¹) ist dagegen nicht signifikant (Tab. 3 und 4). Zu diesem Ergebnis kam es durch den besonders hohen Gehalt an reduzierenden Zuckern in den mit CIPC behandelten Knollen im zweiten Versuchsjahr (Tab. 3). Der Gehalt an reduzierenden Zuckern bei der Sorte Markies war nicht signifikant unterschiedlich bei den Behandlungen mit CIPC und mit Ethylen + 1-MCP und bei der nicht behandelten Kontrolle (Mittelwerte 0,31, 0,82 bzw. 0,39 g kg⁻¹), aber signifikant höher bei den mit Ethylen alleine behandelten Knollen (Mittelwert von 1,77 g kg⁻¹) (Tab. 4).

Nach fünf Monaten Lagerung ist der Gehalt an reduzierenden Zuckern bei den Sorten Verdi und Lady Claire immer tief, fast unabhängig von der durchgeführten Behandlung. Bei den Sorten Agria und Markies ist dieser Gehalt im Vergleich zu den Knollen der Kontrolle (Mittelwert 0,89 g kg⁻¹ bzw. 1,15 g kg⁻¹) oder zu den mit CIPC behandelten Knollen (Mittelwert 0,94 g kg⁻¹ und 0,52 g kg⁻¹) in den mit Ethylen behandelten Knollen dagegen relativ hoch (Mittelwert 1,85 g kg⁻¹ bzw. 2,27 g kg⁻¹). Die Verminderung des Gehalts an reduzierenden Zuckern durch die Behandlung mit Ethylen + 1-MCP scheint nach fünf Monaten Lagerung ausgeprägter zu sein als nach 3 Monaten. So scheint es bei den Sorten Agria und Markies möglich, durch 1-MCP den Gehalt an reduzierenden Zuckern bei einem Wert zu hal-

ten, der mit der unbehandelten Kontrolle vergleichbar ist (Mittelwert 1,13 g kg⁻¹ bzw. 0,54 g kg⁻¹) (Tab. 3).

Der Wirkstoff 1-MCP ist in der Europäischen Union noch nicht für Kartoffeln zugelassen. Sie kann also zur Zeit noch nicht mit dem Ziel angewendet werden, den Gehalt an reduzierenden Zuckern in den gelagerten Knollen zu senken. Die Zulassung dieses Wirkstoffs für Kartoffeln in der Europäischen Union ist für 2022 zu erwarten. Ein hoher Gehalt an reduzierenden Zuckern ist mit dem Risiko brauner Verfärbungen und der Entstehung toxischer Verbindungen beim Frittieren verbunden (Wiberley-Bradford und Bethke 2017). Aus diesem Grund hat unser Partner Zweifel sehr strenge Grenzwerte für den Gehalt an reduzierenden Zuckern vor der Verarbeitung festgelegt (0,4 g kg⁻¹), um das geringste Risiko für das Auftreten brauner Verfärbungen und toxischer Verbindungen (hauptsächlich Acrylamid) im Endprodukt auszuschließen. Unsere Ergebnisse zeigen, dass dieser Grenzwert bei Knollen, die unter einer mit Ethylen angereicherten Atmosphäre gelagert werden, oft überschritten wird, auch bei weniger anfälligen Sorten wie Lady Claire und selbst mit einer Lagerung, bei der das Ethylen mit 1-MCP kombiniert wird (Tab. 3).

Dieser Schwellenwert für reduzierende Zucker kann je nach Endprodukt (Chips oder Pommes frites), Land oder Unternehmen unterschiedlich festgelegt sein. Bei Frigemo, einem Schweizer Hersteller von Pommes frites,

Tab. 3 | Gehalt an reduzierenden Zuckern (g kg⁻¹ Frischgewicht) nach drei und fünf Monaten Lagerung bei Knollen, die mit CIPC, Ethylen bzw. Ethylen + 1-MCP behandelt wurden und bei Knollen der unbehandelten Kontrolle für die vier Sorten, die während den zwei Versuchsjahren getestet wurden.

Substanzen	Zeitraum	Versuchsjahr	Reduzierende Zucker (g kg ⁻¹) bei den verschiedenen Sorten:			
			Agria	Lady Claire	Markies	Verdi
CIPC	3 Monate	2015–2016	0,39	0,06	0,1	0,06
		2016–2017	1,97	0,07	0,51	0,14
	5 Monate	2015–2016	0,74	0,13	0,46	0,13
		2016–2017	1,14	0,29	0,58	0,18
Ethylen	3 Monate	2015–2016	1,77	0,43	1,36	0,18
		2016–2017	2,17	0,41	2,17	0,36
	5 Monate	2015–2016	1,04	NA	2,1	NA
		2016–2017	2,65	0,73	2,43	0,35
Ethylen + 1-MCP	3 Monate	2015–2016	0,66	0,22	0,31	0,09
		2016–2017	0,78	0,29	1,32	0,26
	5 Monate	2015–2016	0,71	0,53	0,69	0,17
		2016–2017	1,54	0,24	0,38	0,51
Kontrolle	3 Monate	2015–2016	0,12	0,18	0,08	0,08
		2016–2017	0,45	0,14	0,7	0,12
	5 Monate	2015–2016	0,68	0,08	0,39	0,15
		2016–2017	1,09	0,51	1,91	0,33

Tab. 4 | P-Werte gemäss Tukey-Test zum Vergleich der Wirkungen der Behandlungen auf den Gehalt an reduzierenden Zuckern (Glucose + Fructose) nach drei Monaten Lagerung für die vier getesteten Sorten (Statistiken über zwei Jahre, *Unterschied statistisch signifikant, (*) Grenze signifikanter Unterschied)

Verglichene Behandlungen	Agria	Lady-Claire	Markies	Verdi
CIPC – Ethylen	>0,05	>0,05	<0,01*	>0,05
CIPC – Ethylen + 1-MCP	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05
CIPC – Kontrolle	0,055 (*)	>0,05	>0,05	>0,05
Ethylen – Ethylen + 1-MCP	<0,01*	>0,05	0,034(*)	>0,05
Ethylen – Kontrolle	<0,001*	>0,05	<0,01*	>0,05
Ethylen + 1-MCP – Kontrolle	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05

ist der Grenzwert sortenspezifisch festgelegt. Vor der Verarbeitung der Kartoffeln zu Pommes frites wird ein Frittieretest mit visueller Kontrolle der Farbe der Pommes frites durchgeführt (Swisspatat 2018). Der Vergleich mit einer Referenztabelle ermöglicht eine Bestimmung des Gehalts an reduzierenden Zuckern in den Pommes frites (Grob 2003). Die Sorte Markies kann zu Pommes frites verarbeitet werden, wenn der Schwellenwert von $0,76 \text{ g kg}^{-1}$ nicht überschritten wird, bei der Sorte Agria liegt dieser Wert bei $0,95 \text{ g kg}^{-1}$ (Schertenleib 2020).

Diese Schwellenwerte werden in unserer Studie bei den Knollen, die unter Ethylen gelagert wurden, systematisch überschritten. Manchmal werden sie selbst bei Kartoffeln überschritten, die unter Ethylen + 1-MCP gelagert wurden (Tab. 3). Aus diesem Grund ist es sehr wichtig, diese Frittieretests und/oder eine Bestimmung des Gehalts an reduzierenden Zuckern vor der Verarbeitung der Kartoffeln zu Chips oder Pommes frites immer

durchzuführen, um die Entstehung toxischer Verbindungen beim Frittieren zu vermeiden.

Ätherische Öle

Die Studie hat gezeigt, dass mit L-Carvon und Limonen eine gute Keimhemmung bei drei Monaten und fünf Monaten Lagerung im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle erreicht wird ($p < 0,01$ und $p < 0,05$). Die Wirksamkeit der beiden Substanzen war vergleichbar, da kein signifikanter Unterschied zwischen der Wirksamkeit von L-Carvon und Limonen gefunden wurde ($p > 0,05$; Abb. 5).

In unseren Versuchen bewirkten die ätherischen Öle Nekrosen bei den apikalen Teilen der Keime.

Vor- und Nachteile der verschiedenen Wirkstoffe

Mit den genannten Substanzen kann CIPC mit unterschiedlicher Wirksamkeit ersetzt werden. Nachteile von

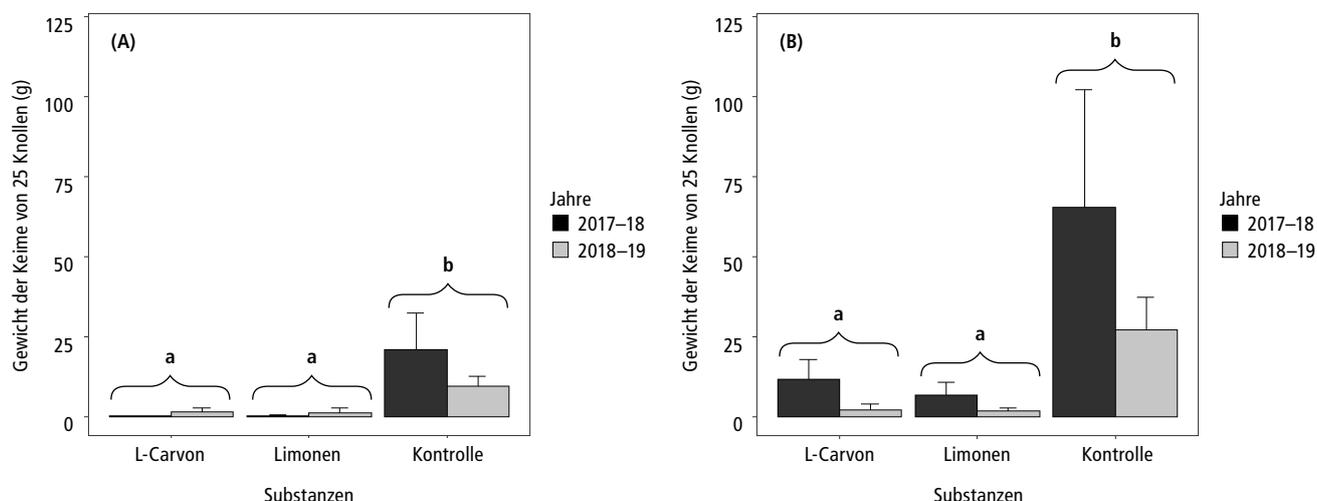


Abb. 5 | Wirksamkeit der ätherischen Öle bei den drei getesteten Sorten Agria, Verdi und Innovator nach drei Monaten Lagerung (A) und fünf Monaten Lagerung (B) während zwei Versuchsjahren: ein Jahr unter halb-industriellen Bedingungen (5 Tonnen = Jahr 2017–2018) und ein Jahr unter industriellen Bedingungen (> 300 Tonnen = Jahr 2018–2019) (Mittelwert \pm Standardfehler). 2017–2018 stammten die Knollen der Kontrolle aus einer unterschiedlichen Parzelle. Bei Mittelwerten, die nicht mit einem identischen Buchstaben gekennzeichnet sind, ist der Unterschied gemäss Tukey-Test signifikant.

Ethylen sind die unterschiedliche Keimhemmung, die je nach Sorte gut bis ungenügend ist (Flesch und Martin 2019), und die negative Wirkung auf den Gehalt an reduzierenden Zuckern bei gewissen Sorten. Ein Nachteil der durch Heissvernebelung angewendeten ätherischen Öle ist die erforderliche Häufigkeit der Behandlungen (alle drei bis vier Wochen), die im Vergleich zu den anderen Produkten zusätzlichen Zeit- und Arbeitsaufwand erfordert. Die ätherischen Öle können aber mit Hilfe eines automatischen Verneblers wie Xedavap® angewendet werden. Mit dieser Art von Geräten lässt sich der Arbeitsaufwand beschränken, wir haben jedoch die Wirksamkeit des Geräts in unseren Versuchen nicht getestet. Ethylen und die ätherischen Öle bieten aber auch gewisse Vorteile. So sind zwei dieser Produkte in der Schweiz bereits zugelassen: das ätherische Minzeöl (L-Carvon, zugelassen unter dem Namen Biox-M®) und Ethylen (zugelassen zur Behandlung von Kartoffeln mit dem Generator Restrain®). Diese Produkte sind mit den Richtlinien des biologischen Landbaus vereinbart und es ist für diese Stoffe kein RHG festgelegt. Ethylen hat den weiteren Vorteil, dass die Anwendungskosten gleich hoch sind wie für CIPC (Martin 2012; Visse-Mansiaux *et al.* 2017). Bei den anderen Alternativen zu CIPC liegen die Kosten im Allgemeinen höher. So ist beispielsweise die Anwendung von Minzeöl mindestens doppelt so teuer wie die CIPC-Behandlung (Curty 2019; Martin 2012; Visse-Mansiaux *et al.* 2017).

1,4-DMN und MH sind sehr wirksam und einfach anzuwenden. Ihr Einsatz ist allerdings für den biologischen Landbau nicht zugelassen und es ist für das Fertigprodukt ein RHG in der EU (RHG = 15 bzw. 60 mg kg⁻¹) (European Commission 2019) und in der Schweiz (BLV 2020) festgelegt. 3-Decen-2-on ist ebenfalls sehr wirksam und leicht anwendbar. Nach unseren Ergebnissen reichen vier Anwendungen, um die Keimhemmung während einer ganzen Lagersaison sicherzustellen. Ausserdem hat dieses Produkt eine kurative Wirkung und es kann eine bei der Lagerung bereits eingetretene Keimung behoben werden. Diese Substanz ist jedoch in der EU und in der Schweiz noch nicht zugelassen. Nach deren Zulassung wäre es sinnvoll, in gleichen Kühlräumen Sorten mit ähnlicher Keimruhe zu lagern, um das Produkt optimal einsetzen zu können, da das Produkt zu Beginn der Keimentwicklung der Knollen angewendet werden sollte (Immaraju 2020). Es ist nicht sinnvoll, Sorten mit langer Keimruhe, die noch keine Keime gebildet haben, gleichzeitig mit bereits keimenden Knollen von Sorten mit kürzerer Keimruhe zu behandeln.

Im Gegensatz zu CIPC, das einfach zu Beginn der Lagerung einmalig gesprüht wird, werden die alternativen

Produkte mehrmalig durch Vernebelung oder kontinuierlich (Sprühen, Begasen) während der ganzen Lagersaison angewendet (Tab. 1). Für eine optimale Wirkung dieser Produkte müssen geeignete Räume mit leistungsfähigen Belüftungssystemen, die den Wirkstoff gut verteilen, zur Verfügung stehen. Die Lagerräume müssen ausserdem ausreichend dicht sein, um ein Austreten der Substanzen zu verhindern, was die Wirksamkeit der Anwendung reduziert und damit direkte finanzielle Verluste zur Folge hat. Da diese Wirkstoffe weniger wirksam als CIPC sind, wäre es sinnvoll, so weit als möglich Sorten mit mittlerer oder langer Keimruhe den Vorzug zu geben.

CIPC wurde vom Markt zurückgezogen, weil ein Risiko von Rückständen in der Schale der Knollen besteht (Ezekiel und Singh 2008), die manchmal den in der EU geltenden RHG von 10 mg kg⁻¹ übersteigen (European Commission 2019). Dieser Stoff hat jedoch den Vorteil, dass er durch das Schälen der Kartoffeln vor der industriellen Verarbeitung grösstenteils oder vollständig entfernt wird. Maleinsäurehydrazid dagegen ist ein systemisches Präparat, das sich im Fleisch der Knollen befindet und folglich bei der Verarbeitung nur teilweise entfernt wird. Allerdings liegen die Rückstände von MH im Allgemeinen deutlich unter dem in der EU geltenden RHG von 60 mg kg⁻¹. 1,4-DMN und 3-Decen-2-on haben gegenüber CIPC und MH den Vorteil, dass kaum Rückstände in den Knollen verbleiben und dass damit auch die Risiken für Gesundheit und Umwelt gering sind. Die in unseren Versuchen durchgeführten Analysen zu den Rückständen von CIPC, MH, 1,4-DMN und 3-Decen-2-on bestätigen die oben erwähnten Informationen (Daten nicht dargestellt).

Schlussfolgerungen

Um Warenverluste während der Lagerung zu vermeiden und eine gute Qualität der gelagerten Kartoffeln über mehrere Monate ohne Keimung aufrechtzuerhalten, ist es wichtig, die verschiedenen als Alternative zu CIPC eingesetzten Wirkstoffe zusammen mit neuen Lagerungsstrategien anzuwenden. Die Forschenden bei Agroscope arbeiten an verschiedenen innovativen Lösungen zur Keimhemmung.

- Es wurde ein Keimungsmodell entwickelt, mit dem die Dauer der Keimruhe und folglich der Keimungszeitpunkt einer Sorte im Verlaufe einer bestimmten Saison auf der Grundlage meteorologischer Parameter während des Wachstums der Kartoffelpflanzen prognostiziert werden kann (Visse-Mansiaux *et al.*

2018). Dieses Modell wird als Entscheidungshilfe für eine bessere Lagerung der Kartoffeln ausgehend vom prognostizierten Keimungszeitpunkt dienen können. Es wird auch dazu beitragen können, die Anwendung keimhemmender Stoffe je nach prognostizierter Dauer der Keimruhe einzuschränken oder zu vermeiden und damit die Behandlungskosten aber auch das Risiko von Rückständen in den Produkten zu senken.

- Agroscope bemüht sich in Zusammenarbeit mit Swisspatat auch um die Identifikation von Sorten für die industrielle Verarbeitung, die gegenüber einer Zuckerbildung durch die Lagerung bei tiefen Temperaturen unempfindlich sind. Durch die Verwendung solcher Sorten ist eine Lagerung bei 4°C oder 6°C möglich, durch die sich die Keimung der Knollen verzögern lässt. Solche Sorten würden auch eine längere Lagerung ermöglichen und/oder es liesse sich die Anwendung keimhemmender Produkte einschränken oder ganz vermeiden. Im Rahmen dieser Bemühungen wurden bereits drei Sorten identifiziert, die gegenüber der Zuckerbildung durch eine Lagerung bei 4°C wenig empfindlich sind: Lady Claire, Verdi und Kiebitz (Visse-Mansiaux et al. 2019).
- Agroscope untersucht auch die Wirkung einer Lagerung bei tiefer Temperatur (4°C) auf Sorten, die gegenüber einer Zuckerbildung empfindlich sind, wenn nachfolgend die Temperatur stufenweise erhöht wird. Tatsächlich haben wir festgestellt, dass mit der progressiven Temperaturerhöhung der Gehalt an reduzierenden Zuckern bestimmter, gegenüber einer Zuckerbildung empfindlicher Sorten deutlich reduziert werden kann (Daten nicht dargestellt). Der Gehalt an

reduzierenden Zuckern kann allerdings selbst bei Sorten, die gegenüber einer Zuckerbildung durch eine Lagerung bei tiefen Temperaturen wenig empfindlich sind, je nach Jahr und Standort des Anbaus schwanken (Daten nicht dargestellt). Deshalb empfehlen wir, bei Kartoffeln, die bei 4°C mit oder ohne Erhöhung der Temperatur gelagert wurden, vor der Verarbeitung immer eine Analyse der reduzierenden Zucker und/oder einen Frittieretest vorzunehmen, um das Risiko brauner Verfärbungen und der Entstehung von Acrylamid beim Frittieren zu begrenzen.

Um eine gute Qualität der gelagerten Kartoffeln und die Nachhaltigkeit der Lagerung von Kartoffeln in der Schweiz vor dem Hintergrund des Anwendungsverbots von CIPC zu gewährleisten, sollten die oben ausgeführten Strategien umgesetzt und kombiniert werden. ■

Dank

Wir danken unseren Schweizer Partnern des Projekts: Fenaco, Zweifel, Innosuisse (Schweizerische Agentur für Innovationsförderung) und Swisspatat. Ebenso danken wir unseren belgischen Projektpartnern: UPL Benelux, der Wallonischen Region (EUREKA-Unterstützung), der universitären Forschungseinrichtung Gembloux Agro-Bio Tech sowie namentlich Prof. Hélène Soyeurt, Dr. Leonard Shumbe und Prof. Hervé Vanderschuren. Schliesslich möchten wir auch den aktiv am Projekt beteiligten Mitarbeitenden von Agroscope und von Fenaco und Zweifel danken, ganz besonders Maud Tallant (Agroscope), Christoph Kohli (Fenaco) und Marco Blumenthal (Zweifel), deren Unterstützung die Durchführung der Versuche während all dieser Jahre ermöglichte. Wir bedanken uns auch herzlich bei den Firmen, die uns die getesteten Produkte lieferten und/oder uns beratend zur Seite standen (Restrain® Company Ltd, AgroFresh, DormFresh Ltd, BASF SA, Xeda International, Andermatt Biocontrol Suisse AG, UPL Benelux, Arysta Life-Science Switzerland Sàrl und AMVAC Chemical corporation), sowie bei der Firma Netagco Suisse GmbH, die uns den Ethylen-Generator zur Verfügung stellte.

Literatur

- Bates D., Maechler M. Bolker B. & Walker S., 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using (lme4). 67, 1-48.
- BioFresh, 2020. Zugang: <https://www.bio-fresh.com/productdetail.php?id=1>.
- Bonnet M., 2020. Herbicides Product Development Lead – Europe, UPL Benelux, comm. pers.
- Caisley J., 2020. Jonathan Caisley, Managing Director at Biofresh Group Limited, comm pers.
- Caldiz D. O., Fernandez L. V. & Inchausti M. H., 2001. Maleic hydrazide effects on tuber yield, sprouting characteristics, and french fry processing quality in various potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars grown under Argentinian conditions. *American Journal of Potato Research* **78**, 119–128.
- Campbell M. A., Gleichsner A., Hilldorfer L., Horvath D. & Suttle J., 2012. The sprout inhibitor 1,4-dimethylnaphthalene induces the expression of the cell cycle inhibitors KRP1 and KRP2 in potatoes. *Functional & Integrative Genomics* **12**, 533–541.
- CERTIS, 2019. BioX-M® Brochure Application & utilisation. Certis Europe BV, Zugang: https://www.certiseurope.be/fileadmin/BE/Downloads/Solutions/Factsheets/Biox-M/Certis_BIOX-M_folder_6p_FR-min.pdf.
- Curty F., 2019. Product manager, Fenaco Genossenschaft, Erlachstrasse 5, CH-3001 Bern, Switzerland. <https://www.fenaco-landesprodukte.ch/>, comm. pers.
- De Barbeyrac J., 2020. Project and regulatory affairs manager chez Xeda International, comm. pers.
- Douglas L., MacKinnon G., Cook G., Duncan H., Briddon A. & Seamark S., 2018. Determination of chlorpropham (CIPC) residues, in the concrete flooring of potato stores, using quantitative (HPLC UV/VIS) and qualitative (GCMS) methods. *Chemosphere* **195**, 119–124.
- EPA, 2013. 3-decen-2-one Fact Sheet. Office of Pesticide Programs U.S. Environmental Protection Agency.

- EU regulation, 2019. Commission implementing regulation (EU) 2019/989 of 17 June 2019 concerning the non-renewal of approval of the active substance chlorpropham, in accordance with Regulation (EC) No 1107/2009 of the European Parliament and of the Council concerning the placing of plant protection products on the market, and amending the Annex to Commission Implementing Regulation (EU) No 540/2011. Zugang: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R0989&from=EN>.
- European Commission, 2019. European pesticides database, Pesticides EU-MRLs, Regulation (EC) No 396/2005. Zugang: <https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/eu-pesticides-database/public/?event=homepage&language=EN>.
- Ezekiel R. & Singh B., 2008. Effect of Cooking and Processing on CIPC Residue Concentrations in Potatoes and Processed Potato Products. *Potato Research* **50**, 175.
- Flesch M. & Martin M., 2019. Expérimentation 2018–2019: Effet de l'éthylène en conservation pour les pommes de terres destinées à la transformation industrielle, Quali'Pom juin 2019, 2 p.
- Fox J. & Weisberg S., 2019. An R Companion to Applied Regression. Sage, Thousand Oaks (CA).
- Grob K., 2003. Eichkurve Korrelation Backtest zu Zuckergehalte durch Dr Konrad Grob, Kantonslabor Zürich.
- Harper G. & Stroud G., 2018. Final Report, Use of ethylene and CIPC on processing varieties of potato, 2013-2016. AHDB Sutton Bridge Crop Storage Research, © Agriculture and Horticulture Development Board 2018, p. 21.
- Immaraju J. A., 2018. Ph.D., Sr. Director of Product Commercialization & International Product Development. AMVAC Chemical Corporation, 4695 MacArthur Court, Suite 1200, Newport Beach, California 92660, USA, comm. pers.
- Immaraju J. A., 2020. The changing landscape for potato sprout control in storage. *Potato Association of America, Spudman*, **58** (6), pp. 28–31.
- Jina A., 2020. Technical Specialist, DormFresh Limited, comm. pers.
- Knowles L. O. & Knowles N. R., 2015a. A model system that elucidates the mode of action of α,β -unsaturated carbonyl compounds as toxicants to potato sprout tissue, 98th Annual Meeting of the Potato Association of America. *Potato Research*, p. 195.
- Knowles L. O. & Knowles N. R., 2015b. Sprout inhibition by α,β -unsaturated aliphatic carbonyls – discovery, chemistry and physiological responses, 98th Annual Meeting of the Potato Association of America. *American Journal of Potato Research*, pp. 195–196.
- Lenth R., 2020. emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means, R package version 1.4.4 ed.
- Martin M., 2012. Pomme de terre Hebdo, le journal de la pomme de terre. CNIPT (Comité National Interprofessionnel de la Pomme de Terre), Arvalis – Institut du végétal, p. 4.
- Martin M., 2020a. Arvalis – Institut du végétal, France, comm. pers.
- Martin M., 2020b. L'après CIPC: comment s'organiser?, Arvalis – Institut du végétal (Ed.), Zugang: <https://www.arvalis-infos.fr/l-apres-cipc-comment-s-organiser-@/view-30943-arvarticle.html>.
- OFAG, 2020. Office fédéral de l'agriculture (OFAG), index des produits phytosanitaires. Zugang: <https://www.psm.admin.ch/fr/produkte>.
- OSAV, 2020. Annexe 2 de l'ordonnance du DFI sur les limites maximales applicables aux résidus de pesticides présents dans ou sur les produits d'origine végétale ou animale (OPOVA). Zugang: <https://www.blv.admin.ch/blv/fr/home/lebensmittel-und-ernaehrung/rechts-und-vollzugsgrundlagen/gesetzgebung-lme.html>
- Paul V. R. E. & Pandey R., 2016. CIPC as a potato sprout suppressant during storage: Present scenario and future perspectives. *Processed Food Industry* **19**, 15–18, 48.
- Prange R., Daniels-Lake B., Jeong J.-C., Binns M., 2005. Effects of ethylene and 1-methylcyclopropene on potato tuber sprout control and fry color. *American Journal of Potato Research* **82**, 123–128.
- R Core Team, 2019. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing.
- Schoene D. L. & Hoffmann O. L., 1949. Maleic Hydrazide, a Unique Growth Regulant. *Science* **109**, 588.
- Schertenleib A., 2020. M. Arnaud Schertenleib, Manager assurance qualité, Frigemo AG, Zugang: <https://www.frigemo.ch/2/groupe-frigemo/>, comm. pers.
- Swisspatat, 2018. Übernahmebedingungen Kartoffelernete 2018, Veredelungskartoffeln.
- Swisspatat 2020. Zugang: <https://www.patate.ch/fr/branche/branche/culture-et-qualite.html>.
- Visse-Mansiaux M., Ballmer T., Tallant M., Shumbe L., Vanderschuren H. & Dupuis B., 2019. Sprouting control of the potato varieties using cold storage. In: Harper, G., Hofman, T. (Eds.), EAPR Post Harvest section meeting 2019. Harper, G. (AHDB Potatoes, Sutton Bridge, UK) and Hofman, T. (Certis Europe BV, Maarsse, Netherlands), The Maids Head Hotel, Norwich, UK.
- Visse-Mansiaux M., Schwaerzel R. & Dupuis B., 2017. Contrôle de la germination, Fiche qualité Swisspatat (Diffusion de fiches techniques sur la pomme de terre en Suisse). Swisspatat.
- Visse-Mansiaux M., Vanderschuren H., Soyeurt H. & Dupuis B., 2018. Dormancy models to optimize the storage of various potato cultivars. In: Scientific committee WPC-ALAP 2018 (Ed.), Abstract Book, 10th World Potato Congress – XXVII ALAP 2018 Congress, Cusco, Peru, p. 90.
- Wiberley-Bradford A. E. & Bethke P. C., 2017. Rate of Cooling Alters Chip Color, Sugar Contents, and Gene Expression Profiles in Stored Potato Tubers. *American Journal of Potato Research* **94**, 534–543.