

Einfluss und Interaktion von Werkstoffen und deren Oberflächenstruktur auf die Adhäsionseigenschaften von Getreideteigen unter Berücksichtigung technologischer und hygienischer Aspekte

Koordinierung:	Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI), Bonn
Forschungsstelle I:	Technische Universität München Wissenschaftszentrum Weihenstephan WZW Lehrstuhl für Brau- und Getränketechnologie Prof. Dr. Thomas Becker/Dr. Mario Jekle
Forschungsstelle II:	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik Lehrstuhl Verfahrenstechnische Maschinen (VM) Prof. Dr. Hermann Nirschl/Dipl.-Ing. Richard-Sebastian Moeller
Industriegruppen:	Verband Deutscher Großbäckereien e. V., Düsseldorf Weihenstephaner Institut für Getreideforschung e. V. (WIG), Freising VDMA-Fachverband Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen e. V., Frankfurt a. M.
	Projektkoordinator: Dr. Theo Koch DIOSNA Dierks & Söhne GmbH, Osnabrück
Laufzeit:	2013 - 2016
Zuwendungssumme:	€ 435.900,-- (Förderung durch BMWi via AiF/FEI)

Ausgangssituation:

Bei der Produktion von Backwaren entstehen oftmals durch an Werkstoffoberflächen (Transportbänder, Gärtücher, Teigteiler, Knetelemente) anhaftende Teigreste zusätzliche Kosten. Durch Adhäsionserscheinungen, die auf molekulare Haftkräfte zwischen dem viskoelastischen System Teig und der Kontaktfläche zurückzuführen sind, lösen sich Teiglinge häufig unzureichend von den Kontaktflächen. Die Klebrigkeit, mit der die Adhäsionserscheinung häufig beschrieben wird, stellt in Bäckereien einen limitierenden Faktor in Hinblick auf den Durchsatz dar. Hieraus resultieren nicht nur unnötige Ruhezeiten der Maschinen durch aufwendige Reinigungs- und Wartungsarbeiten, sondern auch Produktionsausfälle durch verklebte Maschinenteile. Der reibungslose Produktionsablauf ist insbesondere dann gefährdet, wenn leichte Teigstücke, wie Brötchenteiglinge, verarbeitet werden, die sich aufgrund ihres geringen Eigengewichtes nur

sehr schlecht von den Oberflächen ablösen. Sowohl der störungsfreie Produktionsfluss, als auch hygienische Aspekte, wie schimmeltypische Stockflecken, und damit die Langlebigkeit dieser Werkstoffe (vor allem von Gärtüchern) hängen stark von einer Haftkraftausbildung zwischen der Oberfläche und dem Teig ab. Anhaftende Teigreste auf den Werkstoffoberflächen bilden aufgrund ihrer Nährstoffzusammensetzung und ihrer Wasseraktivität einen guten Nährboden für die Schimmelpilzentwicklung. Die Schimmelpilzsporen werden durch Wärme und hohe Luft- bzw. Materialfeuchtigkeit, wie sie z. B. im Gärschrank vorherrschen, bebrütet und keimen aus. Unter Produktionsbedingungen kann an textilen Materialien bereits nach dreiwöchiger Verwendung makroskopisch erkennbarer Schimmelpilzbefall auftreten, welcher lebensmittelrechtlich unerwünscht ist und vermieden werden muss.

Bislang sind nur wenige Hintergründe über die

adhäsionsbestimmenden Faktoren zwischen den Materialien und Teiglingen bekannt. Insbesondere in Hinblick auf die Verkeimung basieren bisherige Entwicklungen neuartiger Werkstoffe meist nur auf empirischen Werten. Um die Haftkräfte und anschließend die Verkeimung der Materialien systematisch verringern zu können, müssen die Wechselwirkungen zwischen Produkt und Werkstoff grundlegend verstanden werden.

Ziel des Forschungsvorhabens war deshalb die Aufklärung der chemisch-physikalischen Grundlagen der Adhäsion von Teigen an Werkstoffen der Backwarenindustrie (Transportbänder, Gärtücher, Teigteile, Knetelemente) in Abhängigkeit der Kontaktdauer und Oberflächenstruktur. Die detaillierte Aufklärung der Zusammenhänge der Haftmechanismen zwischen den Kontaktpartnern (Teig und Oberfläche) ermöglicht die gezielte Auswahl von Materialien mit geringen Adhäsions- und Verkeimungseigenschaften (Stockflecken).

Forschungsergebnis:

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden im ersten Projektabschnitt Haftkraftmechanismen zwischen Teig und unterschiedlichen Werkstoffoberflächen aus dem Backgewerbe (Gärtücher, Transportbänder, Edelstahloberflächen) untersucht. Die Oberflächen wurden in Hinblick auf ihre Strukturierung auf nano- und mikroskopischer Ebene und ihrer Oberflächenbenetzungseigenschaften charakterisiert und ihr Haftverhalten zu Teig mit Hilfe verschiedener Methoden analysiert. Für die Charakterisierung der Oberflächen wurden diese mit dem Laser-Raster-Mikroskop (LSM) hochauflösend aufgenommen und nach den in ISO 25178-2 genannten Oberflächenparametern erfolgreich ausgewertet. Zur Bestimmung der Oberflächenenergie von Gärtüchern wurde die Methode der Kontaktwinkelmessung für die Anwendung bei textilen Oberflächen optimiert. Für die Analyse der Hafteigenschaften zwischen Teig und der Kontaktoberfläche wurde zunächst eine Zentrifugenmethode zur Ermittlung der Haftkräfte von Mehl und Teig erfolgreich adaptiert und im weiteren Verlauf eine Messmethode zur Ermittlung des kontaktzeitabhängigen Ablöseverhaltens von Teigen entwickelt. An geschmirgelten Oberflächen konnte eine Abnahme des Rückhaltevermögens von Mehlpartikeln erst für Rauheiten größer einem Mikrometer (R_q) beobachtet werden. Bei Variation der Luftfeuchtigkeit zeigte sich ein Minimum bei 60 %

relativer Feuchte. Die stärkste und damit hygiene-relevanteste Interaktion von Mehlpartikeln mit Gärtüchern konnte auf deren Profiltäler zurückgeführt werden: Je mehr Fläche sie einnahmen und je tiefer die mikroskopischen Täler waren, desto stärker war die Interaktion zum Mehl. Die Analyse des Haftverhaltens zwischen dem Teig und Werkstoffoberflächen erfolgte nach a) kurzer (≤ 1 min) und nach b) praxisnaher höherer Kontaktdauer (bis 120 min). Nach einer kurzen Kontaktzeit (ermittelt mit modifizierter CHEN/ HOSENEY-Methode) wiesen Edelsehle und Transportbänder (aus TPU, PVC, TPO) mit $F_{\max} = 0,48 - 0,55$ N deutlich höhere Klebrigkeitwerte auf als Gärtücher mit $F_{\max} = 0,25 - 0,36$ N. Innerhalb der untersuchten Transportbänder konnte die Klebrigkeit am stärksten durch eine Strukturierung (Wafel/Rippen) beeinflusst werden. Durch das makroskopisch sichtbare Oberflächenprofil verringerte sich die Kontaktfläche zum Teig und es wurden darunter Luftpolster gebildet, so dass sich geringere Adhäsionskräfte ausbildeten, die zuverlässiger überwunden wurden. Innerhalb der Gärguttextilien konnte nach der kurzen Kontaktzeit kein Einfluss der Materialzusammensetzung beobachtet werden, es lässt sich jedoch ein Zusammenhang mit der Fadendichte der Tücher erkennen (ansteigende Klebrigkeit mit steigender Fadendichte). Innerhalb der Edelstahloberflächen lässt sich im relevanten Rauheitsbereich von $R_a = 0,2-1,2$ μm kein Zusammenhang zur Klebrigkeit erkennen. Erst nach höheren Kontaktzeiten konnte bei den Gärguttextilien ein deutlicher Einfluss der Materialzusammensetzung ermittelt werden. Bei allen untersuchten Gärtüchern stieg die Klebrigkeit mit der Kontaktdauer (von 1-120 min) an, wobei der Teig nach einer Kontaktdauer von 60 Minuten eine signifikant höhere Klebrigkeit bei Polyester Gärtüchern aufwies als bei Baumwollgärtüchern. Die neu entwickelte Methode zur Bestimmung des Ablöseverhaltens nach unterschiedlicher Kontaktdauer zwischen einem Teig und einem Material im Labormaßstab ermöglichte es im Vergleich zur Analyse mittels "Kippapparat", den Material- und Zeitaufwand bei der Versuchsdurchführung stark zu reduzieren. Zudem erlaubt die neue Methode die Untersuchung an diversen Materialien und eine detailliertere Beschreibung des Ablöseverhaltens durch Generierung einer Kraft-Weg-Messkurve und somit wichtiger Messwerte, wie der Maximalkraft, dem Haftweg oder der Adhäsionsarbeit. Die Ermittlung der Zusammenhänge zwischen Haftverhalten nach unterschiedlicher

Kontaktdauer zwischen Teig und Material und der Oberflächencharakteristika Oberflächenstruktur und Oberflächenenergie ergaben also, dass die Kontaktdauer den Haftmechanismus entscheidend bestimmt: Nach a) kurzer Kontaktzeit (≤ 1 min) dominierten die geometrischen Eigenschaften der Oberflächen. Bei Gärtüchern bewirkten größere Maximalhöhen der Spitzen eine geringere Haftung. Da noch keine vollständige Benetzung der Oberfläche eintritt, war ein Einfluss der Oberflächenenergie noch nicht erkennbar. Bei den Transportbändern senkte die makroskopische Strukturierung (Waffel, Rippen) das Haftverhalten zum Teig. Nach b) höheren Kontaktzeiten (bis 120 min) gewann die Oberflächenenergie an Einfluss, nach einer Kontaktdauer von 10 Minuten wurde eine Korrelation zum Haftverhalten ermittelt: So wiesen Materialien mit einer hohen Oberflächenenergie hohe Hafteigenschaften, Materialien mit niedriger Oberflächenenergie auch niedrige Hafteigenschaften zum Teig auf. Bei den Transportbändern senkte eine gröbere Strukturierung das Haftverhalten zum Teig auch nach längerem Kontakt. Zudem beeinflusste auch die Luftdurchlässigkeit der Materialien das Haftverhalten zum Teig: Je höher die Luftdurchlässigkeit war, desto geringer erwies sich das Haftverhalten.

Im zweiten Projektabschnitt wurden drei Gärtücher mit unterschiedlicher Materialzusammensetzung in einer Bäckerei eingesetzt und die Verkeimungskinetik und Langzeitveränderungen auch durch verschiedene Reinigungssysteme (Bürsten, Waschen) der Materialien über 12 Wochen hinweg in Hinblick auf die Strukturveränderung und dem Einfluss auf die Oberflächenenergie und das Haftverhalten analysiert. Die erste Stockfleckenaktivität konnte nach etwa 6 Wochen beim Polyester Gärtuch detektiert werden. Nach 12 Wochen waren bei allen Gärtüchern deutliche Stockflecken an den Gärtüchern zu verzeichnen. Die Ergebnisse der Verkeimungskinetik korrelierten teilweise mit den Ergebnissen der Stockfleckenintensität. Bei allen Materialien war ein deutlicher Anstieg der Keimzahl (Schimmelpilze und Hefen) von $> 10^3$ KbE/25 cm² auf 10^7 KbE/25 cm² mit der Einsatzdauer zu erkennen. Bis zu einer Einsatzdauer von 6 Wochen ergab sich der stärkste Anstieg für das Polyester Gärtuch, was vermutlich mit den Hafteigenschaften zum Teig zusammenhängt. Nach einer Einsatzdauer von 12 Wochen waren keine signifikanten Unterschiede der Verkeimung bei den drei Gärtüchern erkennbar. Die starke Zunahme der Ver-

keimung des Baumwollgärtuchs lässt sich über die ermittelte hohe Wasserdampfaufnahmefähigkeit und die geringe Trocknungsgeschwindigkeit erklären, wodurch das Gärtuch aus Baumwolle eine bessere Grundlage für Keimwachstum darstellte. Aufgrund des stark einsetzenden Keimwachstums sowie des häufigeren Auftretens gesundheitsschädlicher und zellstoffersetzer Keime nach einer Einsatzdauer von sechs Wochen bei allen Gärtüchern wird zu diesem Zeitpunkt ein Wechsel der Tücher empfohlen. Durch die Abnutzung der Materialien im Gebrauch sowie durch die Reinigungssysteme Bürsten und Waschen wurde beim Polyester Gärtuch eine Aufrauung (größere Spitzenhöhen) erzielt, was sich positiv auf das Haftverhalten auch nach langer Kontaktdauer auswirkte (Klebrigkeit sinkt), so dass das Aufrauen der Materialien eine Möglichkeit zur Modifikation und Optimierung von Oberflächen darstellt. Bei den Baumwollgärtüchern bewirkte die Abnutzung durch Gebrauch und wiederholtes Waschen eine Reduktion der maximalen Spitzenhöhen und eine Ausdehnung der Profiltäler, was nachteilig ist. Die Benetzungseigenschaften der Gärtücher wurden durch die Abnutzung verringert, was zum einen durch die Veränderung der Oberflächenstruktur (Aufrauung) und zum anderen durch anhaftende Mehl-, Teig- und Schmutzpartikel beeinflusst wurde. Die im Rahmen des Vorhabens erzielten Ergebnisse bilden eine fundierte Grundlage, um zukünftig eine gezielte Materialauswahl mit geringen Adhäsions- und Verkeimungseigenschaften zum Teig zu ermöglichen.

Wirtschaftliche Bedeutung:

Die Backwarenbranche verzeichnet einen jährlichen Gesamtumsatz von ca. 17 Mrd. € und ist in Deutschland mit rd. 200 Unternehmen, ca. 14.200 handwerklichen Betrieben und ca. 292.000 Mitarbeitern mittelständisch geprägt. Nur 5 Firmen erzielen einen Umsatz von mehr als 150 Mio. €.

Um die Produktivität insbesondere kleiner und mittelständischer Bäckereien zu erhöhen, ist es erforderlich, eine Verlängerung der Nutzbarkeit eingesetzter Materialien zu gewährleisten. Eine Verringerung der Teigadhäsion an Bäckereiwerkstoffen sowie deren Verkeimung stellt insbesondere für Betriebe dieser Größenordnung eine notwendige Randbedingung dar, um die Produktivität zu erhöhen und um sichere Lebensmittel herzustellen. Je nach Art und

Größe der Betriebe müssen z. B. Gärtücher alle 6 bis 30 Wochen ausgetauscht werden. Es fallen dabei hohe Kosten für den Um- und Ausbau, für den Neuerwerb von Werkstoffen und für Reinigungsmittel sowie aufgrund von Produktionsausfällen an. Größere Bäckereien haben den Vorteil, eine weitgehend automatisierte Produktion nutzen zu können, welche den Einbau und die Verwendung von diversen automatisierten Reinigungssystemen (Abbürsten und Absaugen der anhaftenden Teigreste sowie eine nachfolgende IR/UV-Entkeimung) erlauben. Kleinere Betriebe, die ihre Anlagen nicht entsprechend aufrüsten können oder manuelle Kippdielen nutzen, weichen meist auf den Waschvorgang der textilen Werkstoffe aus. Hierbei fallen lange Standzeiten der Maschinen an, da die Materialien manuell ausgebaut, gewaschen, getrocknet und wieder eingebaut werden müssen.

Durch die Aufklärung der Abhängigkeiten der Teigadhäsion bezüglich Werkstoffoberflächenstruktur wird Wissen für eine einfachere und hygienischere Verarbeitbarkeit von Teigen bereitgestellt. Die Ergebnisse tragen dazu bei, dass neue Gewebestrukturen von Zulieferern geschaffen und von Bäckereien genutzt werden können, die die Maschinenstillstandzeiten durch Reinigungsprozesse und das Auswechseln von Materialien in Backbetrieben minimieren. Dies führt insbesondere für Zulieferer sowie für kleine und mittelständische Bäckereibetriebe zu einer deutlichen Kosteneinsparung.

Durch eine Adhäsionsreduktion zwischen Teigling und Oberfläche können die Ausschussmenge von Teiglingen und Backwaren reduziert und zugleich Entsorgungs- und Rohstoffkosten minimiert sowie die Produktivität erhöht werden. Durch die Erhöhung der hygienischen Parameter lassen sich somit sicherere und qualitativ hochwertigere Produkte herstellen.

Von den Ergebnissen profitieren sowohl Bäckereibetriebe als auch Unternehmen des zuliefernden Maschinen- und Anlagenbaus, die ihre Anlagen mit entsprechenden Materialien ausrüsten können.

Publikationen (Auswahl):

1. FEI-Schlussbericht 2016.
2. Laukemper, R., Giraldo, A. M., Hofmann, S., Jekle, M., Jekle, M. und Becker, T.: Microbial contamination and surface properties of proofing carrier cloths after a long-term use. *Cer. Technol.* 1, 4-12 (2018).
3. Moeller, R.-S., Duchardt, A. und Nirschl, H.: Ageing proving cloths – Effects on surfaces and usability. *J. Food Engin.* 214, 218-255, DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2017.07.001 (2017).
4. Laukemper, R., Giraldo, A. M., Jekle, M. und Becker, T.: Verhalten von Gärgutträgern im Langzeiteinsatz. *Brot Backw.* 4, 52 (2017).
5. Moeller, R.-S. und Nirschl, H.: Adhesion and cleanability of surfaces in the baker's trade. *J. Food Engin.* 194, 99-108, DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2016.09.012 (2017).
6. Laukemper, R., Giraldo, A. M., Jekle, M. und Becker, T.: Behavior of proofing carriers in long term use. *Baking bisc.* 4, 38 (2017).

Weiteres Informationsmaterial:

Technische Universität München
Wissenschaftszentrum Weihenstephan WZW
Lehrstuhl für Brau- und Getränketechnologie
Weihenstephaner Steig 20, 85354 Freising
Tel.: +49 8161 71-3262
Fax: +49 8161 71-3883
E-Mail: tbecker@wzw.tum.de

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und
Mechanik
Lehrstuhl Verfahrenstechnische Maschinen (VM)
Straße am Forum 8, 76131 Karlsruhe
Tel.: +49 711 608-42404
Fax: +49 711 608-42403
E-Mail: hermann.nirschl@mvm.uni-karlsruhe.de

Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI)
Godesberger Allee 125, 53175 Bonn
Tel.: +49 228 3079699-0
Fax: +49 228 3079699-9
E-Mail: fei@fei-bonn.de

... ein Projekt der **Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)**

gefördert durch/via

