

Optimierung des Backprozesses durch variable Gestaltung der Wärmeübertragung

Rüdiger Jank und Heiner German

1. Anforderung an den Backprozess

Neben den Prozessparametern Zeit und Temperatur ist die Art der Wärmeübertragung entscheidend für die Gestaltung des Backprozesses. Bis zur ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde Wärme während des Backprozesses im Wesentlichen durch Wärmestrahlung übertragen. Die gewählte Strahlungsintensität ist vom gewünschten Backergebnis und der Backware abhängig. Für Brot, Weizenkleingebäck und Feine Backwaren werden vorzugsweise Emissionstemperaturen gewählt, die im nicht sichtbaren Infrarotbereich zwischen 150 und 300° Grad liegen. Ausnahmen bilden Backwaren, die aufgrund der gewünschten Struktur im sichtbaren Infrarotbereich mit Emissionstemperaturen bis 800° Grad gebacken werden. Die Wärmeübertragung durch Strahlung hat technologisch für den Backprozess die höchste Bedeutung und wird nach wie vor im handwerklichen wie im industriellen Maßstab angewendet. Um den Backprozess zu optimieren und Prozesszeiten sowie den Energieaufwand zu reduzieren, haben sich in den letzten Jahrzehnten auch Konvektionsöfen für die Herstellung von Backwaren durchgesetzt. Durch Strömungsgeschwindigkeiten von drei bis fünf Meter/Sekunde wird die In-

tensität der Wärmeübertragung erhöht. Die Temperatur des Energieträgers kann in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit reduziert werden. Ein weiterer Effekt wird durch die Verringerung der Backzeit erreicht. Besonders bei Kleingebäcken können auch qualitative Vorteile gegenüber Strahlungsöfen erzielt werden. Bei Durchlauf- oder Tunnelöfen, die ausschließlich mit Strahlung beheizt werden, kann durch die offene Bauweise Falschluf das Ofenklima besonders im Bereich des Einlaufes und des Auslaufes verändern. Dieser unerwünschte Luftaustausch ist abhängig von den Partialdrücken im Backraum und in der den Ofen umgebenden Atmosphäre. Durch Anpassung der Druckverhältnisse in der Umgebungsatmosphäre, zum Beispiel durch Luftschleier, durch erhöhte Emissionstemperatur im Ofenein- und Auslauf oder zugeschaltete Konvektion in der ersten Backzone, kann der Wärmeverlust teilweise kompensiert werden.

Öfen, die vorrangig durch Konvektion beheizt werden, eignen sich aber nicht für die Herstellung von Großgebäcken wie freigeschobenes Brot, Stollen oder Sandkuchen. Für jede Gebäckart gibt es eine ideale Wärmeübertragung. Darüber hinaus kann sich, abhängig vom Gebäck, der Rezeptur und der

gewünschten Qualität, die ideale Wärmeübertragungsart während des Verlaufes des Backprozesses ändern. Aufgrund der thermischen Trägheit bestehender Ofensysteme ist eine zeitrelevante und flexible Anpassung der Temperatur bzw. Wärmeübertragung während des Prozessverlaufes bisher nicht möglich.

Weiterhin ist die Produktion von Backwaren mit Molenlinien zwar ideal, wird aber aufgrund kleinerer Losgrößen und ständig wechselnder Sortimente immer mehr zu einer Ausnahme der Prozessführung. Hinsichtlich der verfahrenstechnischen Gestaltung von Backöfen sind Kompromisse unumgänglich. Durch die Entwicklung des Backwarensortimentes in Abhängigkeit veränderter Verzehrsgewohnheiten ergeben sich folgende Anforderungen an den Backprozess:

- große Variabilität
- gleichmäßiges Backergebnis
- Reduzierung des Energieverbrauches
- Steuerung des Backraumklimas

Mit dieser Herausforderung konfrontiert entwickelten die Firmen Kuchenmeister GmbH und German Lebensmitteltechnologie GmbH ein variables Wärmeübertragungsverfahren für den Backprozess. Mit der Firma Kornfeil aus Tschechien wurde ein kompetenter Partner gefunden, der dieses Verfahren konstruktiv umsetzte.

2. Auswahl der Energieträger und Kombination der Wärmeübertragungsarten

Wärmeübertragungsarten treten selten völlig separat auf, die Priorität hat entweder die Konvektion oder die Strahlung. Typische Bauformen dieser angewendeten Wärmeübertragungen sind

- Umwälz- bzw. Zyklothermöfen und Thermoölofen, die durch Wärmestrahlung beheizt werden und
- Konvektionsöfen, bei denen die Wärmeübertragung durch turbulente Luftströmung übertragen wird.

Neben den priorisierten Wärmeübertragungsarten wird Wärme parallel durch Kondensation zu Beginn des Backprozesses und Wärmeleitung auf die Back-

ware übertragen. Der Vorteil der Verwendung von Thermoöl als Energieträger liegt in der höheren spezifischen Wärmekapazität von Thermoöl von ca. 2,7 kJ/kg K in Abhängigkeit von der Temperatur und Öltyp im Vergleich zu Luft von 1,005 kJ/kg K. Durch die höhere Dichte des Thermoöles von 750 kg/m³ im Vergleich zu Luft von 1,204 kg/m³, ist die Masse des Energieträgers wesentlich höher als bei einem Umwälzofen. Während Heißluft bei einem Umwälzofen durch ein Kanalsystem zirkuliert, wird das Thermoöl in mehreren Sekundärkreisläufen durch Radiatoren gepumpt, die Wärme in den Backraum abstrahlen. Eine differenzierte Wärmeübertragung in den Backraum ist bei Thermoöl gegeben. Der Vorteil von Luft besteht in der geringeren Trägheit bei durch Produktwechsel notwendiger Abkühlung des Energieträgers und der höheren Maximaltemperatur von Luft gegenüber Thermoöl. Aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften haben wir uns bei der Konzeption des variablen Ofens für Thermoöl als Primärenergieträger entschieden.

3. Aufbau und Funktionsweise des variablen Thermoölofens

Der Backofen wurde als Durchlaufofen ausgelegt. Ausgehend von der Ofenlänge werden separate Backraumsegmente mit einer Länge von 2.500 mm und einer Breite von 1.000 bis 3.500 mm in Abhängigkeit von der gewünschten Backfläche zu einem Durchlaufofen kombiniert. In jedem Segment besteht die Funktion mit separaten Ventilatoren Luft aus dem Backraum anzusaugen und das Backgut vom oberen bzw. unteren Radiator vertikal anzuströmen. Die Lüfter sind frequenzgesteuert, sodass voneinander unabhängig die Strömungsgeschwindigkeit und die Luftmenge gesteuert werden können. Die Strömungsgeschwindigkeit liegt in Abhängigkeit von der Lüfterbauart zwischen drei und 15 m/s. In dem Ausführungsbeispiel wird eine Strömungsgeschwindigkeit von fünf m/s bei 30 Hz und neun m/s bei 50 Hz erreicht. Die aus dem Backraum abgesaugte Luft strömt turbulent auf und zwischen dem Backgut. Durch die turbulente Strömung wird die fluide Grenzschicht minimiert und der Wärmeübergang verbessert. In der folgenden Abbildung erkennt man

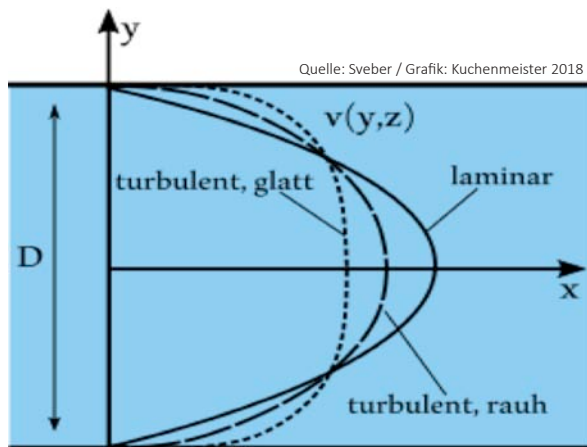


Abb. 1: Rohrströmung

die Reduzierung der fluiden Grenzschicht bei turbulenten Rohrströmungen im Vergleich zu einer laminaren Strömung. Die zwischen den Backformen bestehenden Zwischenräume können in unserem Anwendungsfall als Rohrströmung betrachtet werden.

Im Vergleich zu bestehenden Backöfen werden bei dem variablen Thermoöfen zwei unabhängige Energieträger parallel oder einzeln verwendet. Die einzige Abhängigkeit zwischen den beiden Energieträgern besteht in der Aufheizung des sekundären Energieträgers Luft durch den primären Energieträger Thermoöl. Thermoöl dient als Energieträger für die

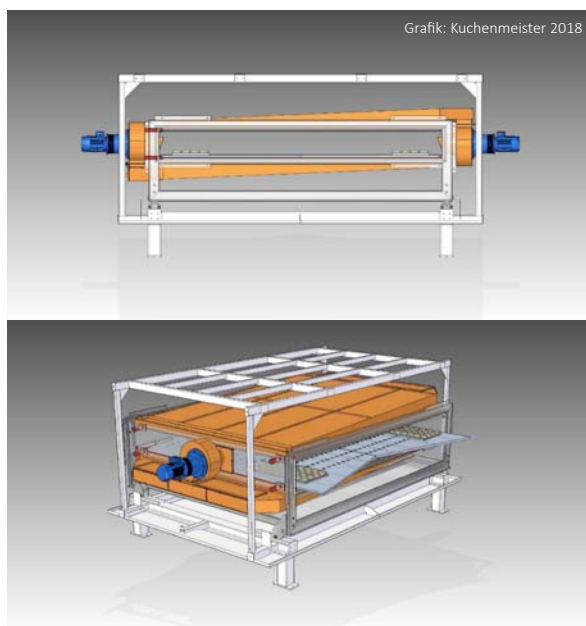


Abb. 2: Darstellung eines Ofensegmentes (schematisch)



Abb. 3: Thermoölführender Radiator (Schema)

Wärmestrahlung und wird in separaten Kreisläufen durch die Radiatoren der einzelnen Ofensegmente gefördert. Jedes Ofensegment besitzt jeweils einen Radiator für die Oberhitze und Unterhitze. Die Thermoölheizung besteht aus einem Primärkreis, der vier Sekundärheizkreise versorgt. Je nach Länge des Ofens speist jeder Sekundärkreis ein bis vier Ofensegmente mit einer separaten Ölpumpe. Die sich im Backraum aufgeheizte Luft wird ausschließlich für die Konvektion genutzt. Abbildung 2 zeigt den Querschnitt eines Ofensegmentes. Je Segment saugen zwei Lüfter unabhängig voneinander Luft aus dem Backraum und fördern diese durch Windkästen in den Backraum. Der Querschnitt der Windkanäle reduziert sich in Förderrichtung, um Druckverluste auszugleichen. Die Strömungsaustrittsrichtung ist jeweils vertikal. Die Windkanäle sind durch die Radiatoren (Pillows) vom Backraum getrennt. Zwischen den ölführenden Strängen des Radiators befinden sich Bohrungen in definierten Abständen, die als Eintrittsdüsen für die Heißluft dienen. In der Abbildung 3 ist ein Radiator als Draufsicht schematisiert dargestellt.

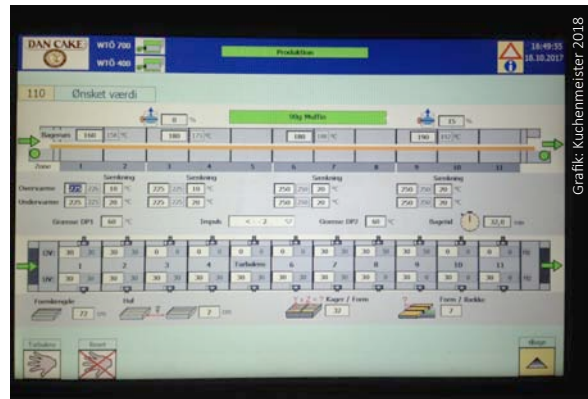
4. Vorteile des variablen Thermoöfens

Durch die parallele, voneinander unabhängige Nutzung von Konvektion und Strahlung kann die Thermoöltemperatur nach den Erkenntnissen bei der Inbetriebnahme des Ofens um 20 K bis 30 K gesenkt werden. Die Temperaturreduzierung ergibt sich aus der technologisch notwendigen Strömungsgeschwindigkeit der turbulenten Luftströmung. Die



Foto: Kuchenmeister 2018

Abb. 4: Auslauf des variablen Thermoöfens. Hersteller: Kornfeil



Grafik: Kuchenmeister 2018

Abb. 5: Grafik der Steuerung auf dem Display

Energieeinsparung liegt zwischen vier bis zehn Prozent je 10 K Temperaturreduzierung. Durch die Reduzierung der Öltemperatur werden beim Aufheizen des Thermoöls sieben bis acht kWh pro zehn K Temperaturreduzierung je 1000 Kilo Thermoöl eingespart. Die spezifische Energieübertragung in jedem Ofensegment ermöglicht eine optimale Einstellung der Energieübertragung in zeitlicher Abhängigkeit vom Backprozess. Der Bediener hat die Möglichkeit während des Verlaufes des Backprozesses die Konvektions- und Strahlungsintensität anzupassen. Durch die vertikale Strömungsrichtung der Heißluft wird eine Beeinflussung der Strömung zwischen den einzelnen Segmenten im Vergleich zu einer horizontalen Strömung minimiert. Durch die Spezifik der Energieübertragung kann mit dem variablen Thermoöfen ein breites Sortiment von Backwaren unter angepassten, optimalen Backbedingungen hergestellt werden.

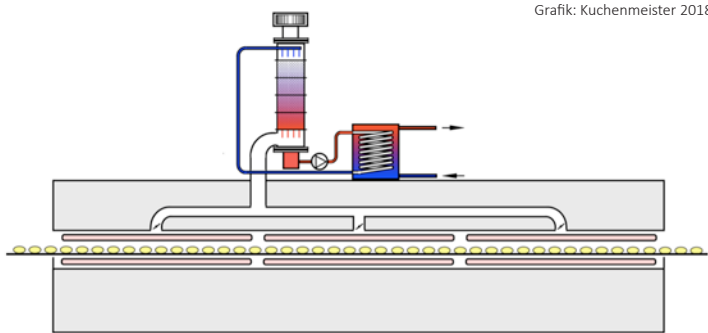
5. Steuerung des Backraumklimas

Der von der Firma Kornfeil gebaute variable Thermoöfen wurde mit einer Steuerung der Firma German Lebensmitteltechnologie (GLT) ausgerüstet, um die verfahrenstechnischen Möglichkeiten durch die Steuerung der Prozessparameter maximal zu nutzen. Mit dem Einsatz der GLT-Ofensteuerung werden energetische und technologische Prozessparameter optimal geführt. Die Steuerung misst und regelt die Temperatur aller Thermoölkreise im Vorlauf und im Rücklauf und passt die Temperatur im primären Thermoölkreis permanent an die Tempera-

tur der Sekundärkreisläufe des Ofens an. Dadurch wird der Energieverbrauch insbesondere gegenüber Backöfen reduziert deren Temperatur im Sekundärkreislauf konstant ist. Bei Erkennen einer Produktionslücke zwischen den Produktreihen im Ofen erfolgt eine Temperaturabsenkung in den Sekundärkreisläufen. Die Absenkung erfolgt spezifisch je nach Produktsorte. Darüber hinaus überwacht die Steuerung das Backraumklima, indem die Backraumtemperatur, die Taupunkttemperatur und der Kaminzug der Schwadenkamine gemessen und den Zielwerten spezifisch nach Produktsorte angepasst werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Backraumfeuchte technologisch sinnvoll im Backraum zu verschieben. So wird die Strahlungsintensität verbessert und der Backschwaden kann bei Bedarf für die Kondensation des Wasserdampfes auf der Gebäckoberfläche genutzt werden. Die Abbildung 5 zeigt die Übersicht der Prozesssteuerung auf dem Display des Bedienungspanels des Ofens.

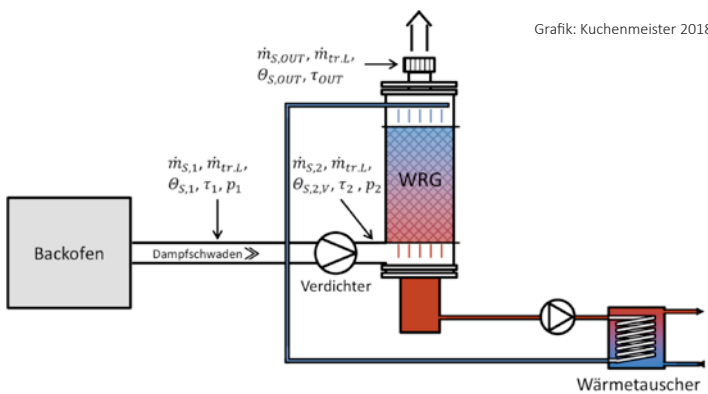
6. Möglichkeiten der Energieeinsparung

Von Kuchenmeister und GLT wurden Verfahren und Vorrichtungen für die Energieeinsparung durch Nutzung der Abwärme entwickelt und teilweise schon angewendet. Neben der Wärmerückgewinnung wird die Geruchsemission durch die vollständige Kondensation des Backschwadens in einem Kondensationsraum minimiert. In der Abbildung 6 ist das Prinzip der Schwadenkondensation und Wärmerückgewinnung dargestellt. Der Backschwaden wird durch einen Kondensator gesaugt. Im Kondensator befin-



Grafik: Kuchenmeister 2018

Abb. 6: Schematische Darstellung der Kondensation



Grafik: Kuchenmeister 2018

Abb. 7: Taupunkterhöhung des Backschwadens (Verfahrensschema).

den sich Kondensationskörper, die von Frischwasser bzw. bei fortlaufendem Prozess mit Kondensat umspült werden. Der Backschwaden kondensiert vollständig, und das bei Taupunktunterschreitung gebildete Kondensat wird im Wärmetauscher zur Erwärmung von Brauchwasser verwendet und als Kondensationsmittel in den Kondensator zurückgeleitet. Die nach der Kondensation des Backschwadens verbleibende Luft wird in die Backhalle zurückgeleitet. Dadurch stabilisieren sich die Druckverhältnisse zwischen der umgebenen Atmosphäre der Backhalle und im Ofen. Ein Abzug des Schwadens durch einen Kamin entfällt. Überschüssiges, für den Prozess nicht benötigtes Kondensat wird in das Abwassersystem geleitet. In der Abbildung 6 ist der oben genannte Prozessverlauf der Kondensation des Backschwadens verdeutlicht (Schema).

Der Taupunkt des Backschwadens liegt bei ca. 60 bis 80°C. Das Verfahren zur Schwadenkondensation und

Verfahrensfließbild kombinierte, mehrstufige Kondensation

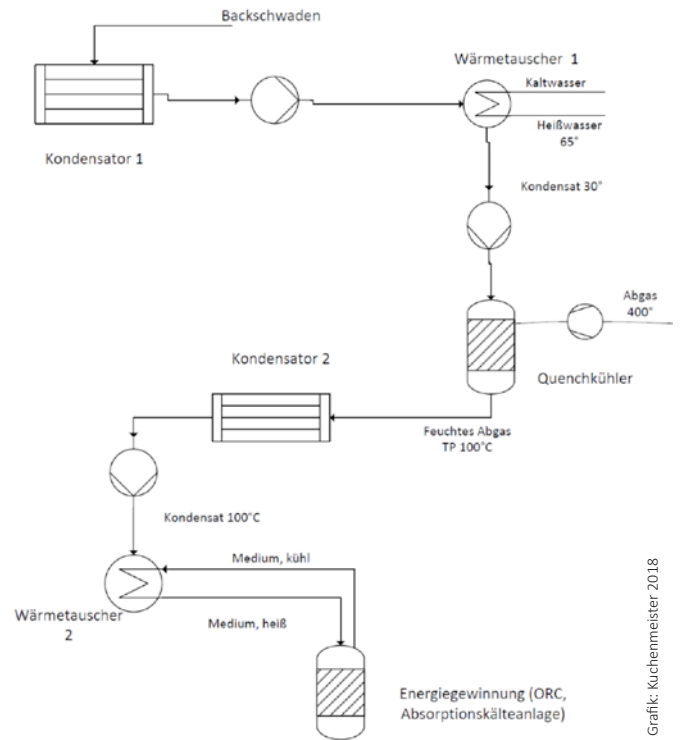


Abb. 8: Optimierung des energetischen Wirkungsgrades bei einem Durchlauf-Backofen durch eine neuartige, zweistufige Wärmerückgewinnung

Vermeidung der Geruchsemission wird bereits an mehreren Öfen für die Herstellung von Toast, Milchbrötchen und Feinbackwaren angewendet. Um die Applikation der Abwärme im nächsten Entwicklungsschritt zu erweitern, wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem der Taupunkt auf >90° erhöht wird.

In der Abbildung 7 wird eine Variante zur Erhöhung der Taupunkttemperatur durch Verdichtung des Backschwadens mit einem Kompressor dargestellt. Bei einer Verdichtung des Backschwadens um 0,2 bar erhöht sich die Tautemperatur um ca. 20 K. Weiterhin ist eine Taupunkterhöhung durch Einspritzen von Wasser, überschüssigem Kondensat aus dem Prozess oder verfügbarem Dampf möglich. Dadurch besteht eine breitere Applikationsmöglichkeit der anfallenden Wärmeenergie für die Kältegewinnung mit Aspirationskälteanlagen oder Stromerzeugung mit ORC-Anlagen (Organic Rankine Cycle) (vergl. Abb. 8). Eine weitere Variante der Wärmerück-

Grafik: Kuchenmeister 2018

gewinnung ist die Möglichkeit der Parallelnutzung der Abwärme des Backschwadens und des Thermoölbrenners in einem integrierten Wärmerückgewinnungsprozess. In der bereits beschriebenen und realisierten Prozessstufe der Kondensation und Wärmerückgewinnung in einem Wärmetauscher zur Warmwasserbereitung (Abb. 6) wird in einer Prozessweiterung das anfallende Kondensat, neben der Nutzung als Kondensationsmittel, zum Befeuchten und Abkühlen des Abgases vom Thermoölbrenner in einem sogenannten Quenchkühler verwendet. Das so generierte feuchte Abgas hat dann einen Taupunkt zwischen 95° und 100° Grad und kondensiert in einem zweiten Kondensator. Mit diesem energiereichen Kondensat können Absorptionskälteanlagen oder ORC-Anlagen versorgt werden. Das Kondensat wird in den Prozess zurückgeführt. Spezifische Untersuchungen und praktische Erfahrungen können belegen, dass der energetische Wirkungsgrad auf ca. 90 Prozent erhöht werden kann.

7. Zusammenfassung

Durch die variable Gestaltung der Wärmeübertragung während des Backprozesses wird eine optimale Prozessführung in Abhängigkeit vom fortschreitenden Backprozess und von der Spezifik des Gebäckes und der angewendeten Rezeptur möglich. Der gesamte Backprozess kann entsprechend den optimalen Bedingungen geführt werden. Konvektion und Strahlung werden unabhängig voneinander intensiviert oder reduziert. Weiterhin werden die Möglichkeiten der Prozesssteuerung hinsichtlich Backraumklima und Wärmeübertragung erläutert. Im letzten Abschnitt werden die Erfahrungen und Möglichkeiten einer emissionsfreien und energiesparenden Wärmerückgewinnung dargestellt. Die Erhöhung des energetischen Wirkungsgrades von ca. 60 Prozent auf über 90 Prozent wird am Beispiel der mehrstufigen Wärmerückgewinnung gezeigt.

Autor:

Rüdiger Jank

Kuchenmeister GmbH

Leiter Forschung und Entwicklung

Lange Wende 6

59494 Soest

Telefon: 02921-7808424

8. Literaturverzeichnis:

Patentanmeldung EP 2 677 872 A1; Verfahren zur Entfernung von in Schwaden enthaltenen organischen Inhaltsstoffen

Patentanmeldung EP 3 166 409 A2; Multivariables Backverfahren und Vorrichtung dafür

Patentanmeldung WO 2017/064036 A1; Verfahren zur Energiegewinnung aus Wasserdampf enthaltenden Schwaden und Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens

Patentanmeldung EP 3 251 514 A1; Mehrstufiges Verfahren zur Energiegewinnung in Backanlagen und Anlage zur Durchführung des Verfahrens

Schulte, Stephen: Wärmerückgewinnung bei industriellen Backprozessen, Bachelorarbeit Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2015

- Anzeige -

Ernst Böcker GmbH & Co. KG
32427 Minden · Germany
www.sauerteig.de
www.glutenfrei-vom-baecker.de

BÖCKER
Ihr Sauerteig-Spezialist