Modellgestützte Optimierung verfahrenstechnischer Aspekte bei der Kaffeeextraktion



Koordinierung:	Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI), Bonn
Forschungsstelle(n):	Technische Universität München School of Life Sciences Forschungsdepartment Life Science Engineering Lehrstuhl für Systemverfahrenstechnik Prof. Dr. Heiko Briesen Technische Universität München School of Life Sciences Forschungsdepartment Life Science Engineering Professur für Biothermodynamik Prof. Dr. Mirjana Minceva Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (IVV), Freising Prof. Dr. Andrea Büttner/Dr. Eva Ortner
Industriegruppe(n):	Deutscher Kaffeeverband e. V. (DKV), Hamburg
Projektkoordinator:	Dr. Ingo Lantz Tchibo GmbH, Hamburg
Laufzeit:	2019 – 2022
Zuwendungssumme:	€ 777.300,--

Ausgangssituation

Kaffee ist als Handels- und Konsumgut von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Im wissenschaftlichen Verständnis der Verarbeitungskette von Kaffee, d. h. vom Anbau bis hin zum fertigen Getränk, gibt es jedoch noch erhebliche Wissenslücken, was die Verfahrenstechnik der Kaffeeextraktion anbelangt. Dabei ist der Schritt der Zubereitung des Kaffeegetränks die letzte Eingriffsmöglichkeit, in der die Qualität und die Charakteristika des finalen Getränks beeinflusst werden können. Dass die Zubereitung bisher nicht detaillierter untersucht wurde, ist umso erstaunlicher, da es seit geraumer Zeit immer umfangreichere Einflussmöglichkeiten auf den Extraktionsprozess gibt. Es fehlt aber an geeignetem Prozesswissen, um diese neuen Eingriffsmöglichkeiten gezielt nutzen zu können. Dabei wurde gerade in den vergangenen Jahren das Potential einer mechanistischen Modellierung der Kaffeeextraktion von verschiedenen Forschungsgruppen gezeigt, jedoch noch nicht ausreichend mit vorhandener Messtechnik gekoppelt und auch nicht zur gezielten Prozessverbesserung verwendet.

Ziel des Forschungsvorhabens war es daher, über ein mechanistisches Prozessmodell Vorhersagen zur gezielten Beeinflussung der Kaffeeextraktion hinsichtlich einer geschmacklichen Verbesserung zu machen. Steuergrößen sollten hierbei die Wassertemperatur, die Strömungsgeschwindigkeit sowie die Partikelgröße des gemahlenen Kaffees sein. Das mechanistische Prozessmodell sollte über experimentelle Daten, vor allem

Zeitreihen, die die Kinetik des Extraktionsprozesses erfassen, parametriert werden und parallel hierzu eine sensorische Evaluierung der erhaltenen Kaffeegetränke stattfinden.

Forschungsergebnis

Mit Hilfe von Anforderungsliste, Funktionsanalyse und morphologischem Kasten wurde das Konzept für einen Versuchsstand zur Kaffeeextraktion auf der Basis der VDI-Richtlinie 2221 entwickelt. Kernstück des Versuchsstandes ist die dynamische Mischung zweier, unterschiedlich temperierter Wasserströme, um in kürzester Zeit möglichst genau dem gewünschten Temperaturprofil im Portafilter zu entsprechen. Zur besseren Regelung werden Pumpen zur Druckerzeugung eingesetzt, da das erwünschte Temperaturprofil direkt mit den Durchflussmengen der einzelnen Wasserströme korreliert. Im Einzelnen sind fünf Temperatursensoren, zwei Drucksensoren und drei Durchflusssensoren zur Steuerung und Datenerfassung verbaut. Die Regelungsstrecke der Heizungsboiler und der Pumpen umfasst sechs PID-Regler (Proportional-Integral-Derivative Controller).

Ergänzend wurde eine Espressomaschine der Firma Decent Espresso zu Vergleichszwecken eingesetzt. Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse, die bei den Vorversuchen durch Einsatz der Decent Espresso gewonnen wurden, wurde entschieden, dieses Gerät auch für die Hauptversuche einzusetzen, um die Beständigkeit der Datenqualität zu gewährleisten. Parallel hierzu wurde der selbstentwickelte Versuchsstand zur Analyse der Durchströmung und der Feinpartikelmigration eingesetzt.

Im Laufe des Projekts wurden drei High-Performance-Liquid-Chromatography (HPLC)-Methoden für die Analyse der nichtflüchtigen Stoffe etabliert. Diese ermöglichen die Analyse von (1) Trigonellin, Koffein, Chlorogensäuren I – V, (2) den Chlorogensäurelaktonen und (3) organischen Säuren. Eine neuartige Methode zur direkten Quantifizierung von einzelnen Aromastoffen im Kaffee auf Basis der Direkt-Injektions-Massenspektrometrie (DIMS) wurde etabliert und validiert. Insgesamt lieferte die Methode präzise Ergebnisse (Standardabweichung < 10 %) für 23 von 25 analysierten Substanzen im Spurenbereich (pptv- bis ppbv-Konzentrationen).

Ein statistischer Versuchsplan wurde erstellt, um eine hohe Anpassungsgüte des Modells bei gleichzeitig reduziertem experimentellen Aufwand zu ermöglichen. Nach diesem Versuchsplan wurde der Einfluss von Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit und Mahlgrad auf die Extraktionskinetiken sämtlicher nichtflüchtiger und flüchtiger Analyten sowie die zeitliche Änderung von Farbe, TdS (total dissolved solids, Gesamtgelöststoffgehalt) und pH-Wert untersucht.

Bei den nichtflüchtigen Stoffen und den TdS zeigte sich, dass die Konzentrationsunterschiede mit Variation der Temperatur und der Strömungsgeschwindigkeit deutlich geringer ausfielen als ursprünglich erwartet. Eine Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit führte zu einer geringfügigen Erhöhung der Konzentration dieser Stoffe, während der Effekt der Temperatur zwar je nach Substanz unterschiedlich ausfiel, dieser jedoch statistisch nicht signifikant war. Hinsichtlich des Mahlgrads war bei besonders feiner Mahlung eine Erhöhung der Anfangskonzentration zu beobachten. Bei Vergleich der Extraktionskinetiken unterschiedlicher Substanzen fiel auf, dass die Konzentrationsabnahme größerer und weniger polarer Moleküle deutlich langsamer war als bei kleinen polaren Stoffen.

Ähnliches konnte für die gemessenen Aromastoffe beobachtet werden. Für unpolarere, flüchtige Substanzen wurden insgesamt flachere Extraktionskurven sowie höhere Gesamtextraktionen bei erhöhter Temperatur beobachtet. Bei der Variation der Flussrate wurden häufig geringere Extraktionsmengen bei 2 mL/s im Vergleich zu 1 oder 3 mL/s erzielt, was möglicherweise mit der längeren Extraktionszeit bei 1 ml/s oder dem höheren Druck bei 3 ml/s zu begründen wäre. Es wurde ein erwartbarer Einfluss des Mahlgrads auf den Extraktionsdruck beobachtet (geringere Partikelgröße führt zu höherem Druck), auch wenn die Unterschiede in der Partikelgrößenverteilung sehr gering waren. Der Einfluss des Mahlgrads auf die Konzentrationen der extrahierten Aromastoffe war unterschiedlich je nach Substanz, wobei sich insbesondere die Menge beim mittleren Mahlgrad (1,4) von den beiden anderen (0,8 und 2,0) unterschied.

Um mögliche Korrelationen zwischen den chemoanalytischen Daten und dem Geschmackseindruck der Kaffeeextrakte zu analysieren, wurde ein Sensorikpanel rekrutiert und für die Durchführung einer quantitativ

deskriptiven Analyse (QDA) trainiert. Zur Qualitätskontrolle wurde das Panel auf Panelperformance untersucht; es erzielte hierbei gute Ergebnisse. Ein umfangreiches Probenset, das verschiedene Röstkaffees und verschiedene Zubereitungsmethoden (Handfilter vs. Siebträgermaschine) sowie Variationen in der Brühtemperatur und im Mahlgrad des Röstkaffees umfasst, wurde vom Panel analysiert und es konnten klare Unterschiede zwischen den verschiedenen Varietäten und Zubereitungsmethoden festgestellt werden. Ein Einfluss der Brühtemperatur oder des Mahlgrads konnte allerdings nicht festgestellt werden. Dies zeigt, dass der Einfluss der Zubereitungsmethode und des gewählten Rohkaffees größer sind als der gewählten Extraktionsparameter.

Die verschiedenen Extraktionsszenarien wurden in einer großen Konsumentenstudie (187 Teilnehmer) und mithilfe eines neu trainierten Panels evaluiert, da zwischen den Versuchen 1,5 Jahre Zeit lagen. Die Konsumenten bevorzugten den Sauergeschmack bei Brühtemperaturen von 80 und 89 °C im Vergleich zu 98 °C. Zudem wurde die Hedonik unterschiedlich bewertet je nach Geschlecht, Altersgruppe, Art des Kaffeekonsums (z. B. mit Milch, schwarz) und Frequenz des Kaffeekonsums der Panelisten. Beispielsweise bevorzugten Espresso-Trinker die Kaffees insgesamt mehr und Mit-Milch-Trinker weniger. Frauen mochten den Sauergeschmack weniger als Männer und nahmen diesen Eindruck als intensiver wahr. Bei Betrachtung der Schwarztrinker zeigte sich, dass der saure Eindruck bei 98 °C signifikant weniger präferiert und als saurer empfunden wurde als bei 89°C.

Ein Ranking mit trainierten Panelisten nach Sauer- und Bitter-Intensität zeigte, dass die Kaffees mit zunehmender Extraktionstemperatur sowie bei gröberem Mahlgrad als intensiver sauer wahrgenommen wurden. Jedoch waren diese Effekte aufgrund hoher Streuung im Panel nicht signifikant, was auf geringe Unterschiede zwischen den Proben und einen insgesamt sehr intensiven Sauergeschmack zurückgeführt werden könnte. Für den Bittergeschmack konnten keine Trends erkannt werden. In einer einfach beschreibenden Prüfung mit trainiertem Panel wurde der fruchtige Geruch nach einer Extraktionstemperatur von 80 °C intensiver bewertet als bei Proben mit höheren Extraktionstemperaturen. Für andere Attribute konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

Zur Entwicklung eines geeigneten mechanistischen Modells wurden unterschiedliche Modellannahmen verglichen und deren Anpassungsgüte hinsichtlich der Konzentrationsdaten geprüft. Ein existierendes bi-disperses Modell von MORONEY et al. (2019) wurde aufgrund seiner hohen Anpassungsgüte bei gleichzeitig geringer Parameterzahl zur Beschreibung der Extraktionskinetiken ausgewählt. Das Modell wurde um Gleichungen zur Beschreibung des Einflusses der Temperatur und der Strömungsgeschwindigkeit ergänzt.

Eine numerische Methode zur optimalen dynamischen Steuerung von Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit wurde auf Basis des Prozessmodells entwickelt. Die Methode ist dazu geeignet, Temperatur- und Volumenstrom-Zeit-Kurven zu identifizieren, die für das Erreichen definierter Stoffkonzentrationen optimal sind. Dieser Ansatz ist insbesondere dann sinnvoll, wenn erhebliche Unterschiede mit Veränderung der Steuerung auftreten. Nachdem sich bei der experimentellen Untersuchung der nichtflüchtigen Stoffe eine sehr geringe Sensitivität gegenüber diesen beiden Prozessgrößen herausstellte, wurde dieser Ansatz allerdings nicht weiterverfolgt und der Fokus stattdessen auf die präzise Vorhersage der Stoffkonzentrationen gelegt.

Die gemessenen Konzentrationen der schwerflüchtigen Substanzen Koffein, Trigonellin, Chlorogensäure, Monocaffeoylquinide, Dicaffeoylchinasäuren und Feruloylquinide sowie der TdS wurden zur Anpassung der Modellparameter herangezogen. Eine hohe Anpassungsgüte wurde hierbei erreicht, die die strukturelle Eignung des Prozessmodells unterstreicht. Zur Validierung der Vorhersagen des Modells wurden Simulationen des parametrierten Modells mit zusätzlichen experimentellen Daten verglichen, wobei neben konstanter Steuerung dynamische Steuerungskurven der Temperatur- und Strömungsgeschwindigkeit betrachtet wurden. Die Ergebnisse zeigten, dass die Konzentrationsunterschiede mit der Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit für diese Stoffe bei gleicher extrahierter Espressomenge so gering sind, dass sie innerhalb der Messschwankung liegen. Bei Einstellung eines sinkenden Temperaturgradienten stellte sich allerdings heraus, dass dieser zu einer erhöhten Strömungsgeschwindigkeit führte, was einen signifikanten Konzentrationsunterschied aufgrund des höheren Getränkevolumens zur Folge hatte. Zusammengefasst weisen diese Ergebnisse darauf hin, dass

das finale Espressovolumen und somit das Kaffee-Wasser-Verhältnis einen wesentlich größeren Effekt auf die Stoffzusammensetzung der Wasserphase im Getränk hat als die Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit bei gleichem Endvolumen.

Zum einfachen Transfer der Ergebnisse wurde eine benutzerfreundliche App entwickelt, in der der Benutzer die Steuergrößen beliebig variieren und die vom Modell vorhergesagte Ausbeute in Form eines Diagramms, einer sog. „Heat map“, untersuchen kann. Dieses Diagramm kann als Ergänzung zum bisher existierenden „Coffee Brewing Control Chart“ herangezogen und um beliebig viele weitere Stoffe ergänzt werden.

Wirtschaftliche Bedeutung

Kaffee ist das in Deutschland beliebteste Getränk mit einem jährlichen Pro-Kopf-Verbrauch von 169 Litern (2021). Gemessen am Konsum ist Deutschland damit der viertgrößte Kaffeemarkt der Welt. Der Umsatz der Branche beträgt etwa 19 Mrd. € pro Jahr (Verkauf von Trockenkaffeeprodukten, insbesondere Röstkaffee und löslicher Kaffee, darin ist nicht enthalten der Verkauf von trinkfertigen Getränken). Darüber hinaus sind Hersteller hierzulande sehr exportaktiv; Deutschland gehört international zu den führenden Exporteuren von Kaffeeprodukten.

Über 1.000 Unternehmen haben in Deutschland direkt mit dem Produkt Röstkaffee zu tun. Hierzu zählen Röster, Maschinenhersteller, Hersteller von löslichem und entkoffeiniertem Kaffee sowie Kaffeeschulen. Rund 90 % der Betriebe sind kleine und mittlere Unternehmen (KMU), die auf Grundlage der Ergebnisse die Qualität ihrer Produkte optimieren sowie neue innovative Produkte entwickeln können.

Publikationen (Auswahl)

1. FEI-Schlussbericht 2022.
2. Pannusch, V. B., Schmieder, B. K., Vannieuwenhuyse, L., Minceva, M., & Briesen, H.: Model-based kinetic espresso brewing control chart for representative taste components. J. Food Eng. 367, 111887 (2024).
3. Schmieder, B. K., Pannusch, V. B., Vannieuwenhuyse, L., Briesen, H., & Minceva, M.: Influence of flow rate, particle size, and temperature on espresso extraction kinetics. Foods 12 (15), 2871 (2023).

Weiteres Informationsmaterial

Technische Universität München
School of Life Sciences
Forschungsdepartment Life Science Engineering
Lehrstuhl für Systemverfahrenstechnik
Gregor-Mendel-Str. 4, 85354 Freising
Tel.: +49 8161 71-3272
Fax: +49 8161 71-4510
E-Mail: briesen@tum.de

Technische Universität München
School of Life Sciences
Forschungsdepartment Life Science Engineering
Professur für Biothermodynamik
Prof. Dr. Mirjana Minceva
Maximus-von-Imhof-Forum 2 85354 Freising
Tel.: +49 8161 71-6170
Fax: +49 8161 71-3180
E-Mail: mirjana.minceva@tum.de

Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (IVV)
Giggenhauser Straße 35, 85354 Freising
Tel.: +49 8161 491-715
Fax: +49 8161 491-111
E-Mail: andrea.buettner@ivv.fraunhofer.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

Förderhinweis

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

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

AiF Forschungsnetzwerk Mittelstand
FEI FORSCHUNGSKREIS DER ERNÄHRUNGSINDUSTRIE E.V.
IGF Industrielle Gemeinschaftsforschung

Das o. g. IGF-Vorhaben der Forschungsvereinigung Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI), Godesberger Allee 125, 53175 Bonn, wird/wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Bildnachweis - Seite 1: © anastasianess - stock.adobe.com #131102978

Stand: 24. April 2025