

Automatische Kontrolle des Fettgehalts in Mehrfachchargen von Fleischabschnitten durch prozessanalytische Technologie

Von Jens Petter Wold, Frøydis Bjerke und Ingrid Måge

Große Mengen der Schlachtkörper von Schweinen und Rindern enden als Abschnitte. Die Chargen mit den Abschnitten werden hauptsächlich nach ihrem Fettgehalt bewertet. Eine bessere industrielle Kontrolle des Fettgehalts dieser Chargen ist deshalb zur Sicherung beständiger Qualität und Rentabilität in der Industrie sehr wichtig. In dieser Arbeit bewerteten die Autoren eine neue Strategie zur automatischen Sortierung der Fleischabschnitte direkt am Band in Chargen mit vordefiniertem Fettgehalt. Der Optimierungsalgorithmus basierte auf sogenannten Wunschfunktionen, und in den Algorithmen wurden für jede Portion der Abschnitte die am Band gemessenen Werte für Gewicht und Fettgehalt eingegeben. 92 Portionen Schweinefleischabschnitte (insgesamt 227 kg) mit einem Fettbereich zwischen 4,5% und 80,1% wurden je viermal mit einem NIR-System direkt am Band gescannt, um Schätzungen des Fettgehalts zu erhalten. Alle Daten wurden unter industriellen Bedingungen in einem Pilotwerk gesammelt und es wurden Computersimulationen zum Test von vier unterschiedlichen Sortierregimen eingesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Sortieralgorithmus Chargen produziert, die sehr eng an den Zielfettwerten liegen; die typische Abweichung liegt innerhalb eines Prozentpunktes. Der Vorhersagefehler für Fett auf Chargenniveau lag unter $\pm 1,0$ Prozentpunkten bei den Niedrigfettchargen und im Bereich von 1,0 – 1,5 Prozentpunkten bei den Hochfettchargen. Die Ergebnisse zeigen, dass automatische Systeme zur Messung und Sortierung von intakten, nicht einheitlichen Fleischabschnitten direkt am Band den Weg für eine flexible und kosteneffiziente Produktion von Fleischchargen öffnen.

In der Fleischindustrie sind die ökonomischen Margen gering, und die Rentabilität hängt von der optimalen Ausnutzung der Schlachtkörper ab. Die Produktion wird größtenteils nach Qualitätskriterien wie Muskelqualität, Fett und Bindegewebsanteil gesteuert. Ein Hauptprodukt der Schweine- und Rinderentbeinungsbetriebe sind Chargen von Fleischabschnitten, die nach ihrem Fettgehalt bewertet werden: je niedriger der Fettgehalt, desto höher der Verkaufswert. Ganze 60% der Schlachtkörper von Rindern und etwa 45% der Schlachtkörper von Schweinen enden als Abschnitte. Eine bessere industrielle Kontrolle des Fettgehalts in diesen Chargen ist sehr wichtig, um eine beständige Qualität und Rentabilität sicherzustellen.

Die traditionelle Art der Erzeugung dieser Fleischchargen besteht darin, dass die Arbeiter in der Verarbeitungslinie die Abschnitte manuell sortieren, um den gewünschten Anteil an Fett – typischerweise 10, 20 oder 30% – in den Chargen zu erzielen. Jedoch ist dies schwierig, und große Abweichungen vom Zielfettgehalt sind üblich. Für die Industrie bedeutet es auch Kosten, dass ständig neue Arbeitskräfte eingestellt und für diese Aufgabe geschult werden müssen. Die Bedeutung, den Fettgehalt in den Chargen zu kennen, hat zur Entwicklung automatischer Kontrollsysteme geführt. Heutzutage werden mindestens drei unterschiedliche Messprinzipien angewandt. Die Systeme beruhen auf den nicht invasiven Techniken der Mikrowellen, Röntgenstrahlen oder der Spektroskopie im nahen Infrarotbereich (NIR) (HILDRUM, WOLD, SEGTMAN, RENO und DUFOUR, 2006). Diese Systeme werden eingesetzt zur Überprüfung, ob der erreichte Fettgehalt der Chargen korrekt ist. Bei Mikrowellensystemen ist es normalerweise erforderlich, dass das

Schlüsselwörter

- Kontrolle des Fettgehalts
- Optimierung
- Sortierung
- Automatisches System
- Fleischabschnitte

Fleisch vor der Messung zerkleinert wird, und sie eignen sich daher nicht für intakte Abschnitte. Röntgensysteme können an intaktem Fleisch eingesetzt werden, entweder an bereits gefüllten Wannen oder an Serien von Abschnitten (SensorX von Marel Ltd, Island, und Meat-Master von Foss, Dänemark). Röntgenstrahlen haben den Vorteil, dass die Strahlung auch dicke Stücke durchdringt und der Fettanteil in sehr unterschiedlichen Stücken verhältnismäßig genau gemessen werden kann. Die NIR-Spektroskopie wird ebenfalls viel verwendet zur Bestimmung von Fett, Protein und Wasser in Hackfleisch direkt am Band (TØGERSEN et al., 1999). Aber eine Einschränkung gegenüber den Röntgenstrahlen besteht darin, dass die NIR-Methode eine begrenzte Durchdringungstiefe besitzt und hauptsächlich die obere Schicht (15 – 20 mm) misst, wenn sie im sogenannten Interaktionsmodus eingesetzt wird. Wenn die Proben in etwa homogen sind oder die Oberflächenschicht repräsentativ für die gesamte Probe ist, dann bringt die Methode gute Ergebnisse. Dies wurde zum Beispiel gezeigt bei der Fettbestimmung in Wannen mit 20 kg Schweinefleischabschnitten (O'FARRELL et al., 2010). WOLD et al. (2011) zeigte, dass, obwohl der Vorhersagefehler pro Abschnitt bei der NIR sehr hoch lag ($\pm 8,7\%$), er für die sich ergebenden Chargen von 10 – 24 kg $\pm 1,3\%$ und für die größeren 100-kg-Chargen nur 0,6% betrug. Bei zunehmender Chargengröße wird größere Genauigkeit erzielt, weil zufällige Vorhersagefehler bei den Abschnitten reduziert oder gemittelt werden. Die beiden letzten Studien wurden mit einem kommerziellen bildgebenden NIR-Scanner durchgeführt (Tomra Sorting Solution, Leuven, Belgien). Ein Vorteil von NIR gegenüber Röntgenstrahlen besteht darin, dass die Systeme einfacher in unterschiedliche Produktionslinien integriert werden können, da kein Strahlenschutz erforderlich ist und kompaktere Systeme möglich sind. NIR-Systeme sind auch preisgünstiger und somit auch für mittelgroße und kleinere Unternehmen erschwinglich.

In der Fleischindustrie werden diese direkt am Band eingesetzten Methoden hauptsächlich zur Überwachung des Fettgehalts in den Endprodukten angewandt. Der Fettgehalt in den produzierten Chargen kann nachträglich angeglichen werden. Dies ist umständlich und kann auch sehr unwirtschaftlich sein, vor allem wenn der Fettgehalt durch Hinzufügen wertvollen Magerfleisches verringert werden muss. In einigen Produktionsbetrieben kann der Fettgehalt in den Chargen manuell während der Produktion durch Prüfung des angesammelten durchschnittlichen Fettgehalts geregelt werden. Jedoch ermöglichen Verfahren direkt am Band dem Hersteller, den Fokus von der Rückwärtssteuerung und manuellen Anpassung zur Vorwärtssteuerung und Optimierung des Prozesses zu verschieben. Dieser Ansatz, der oft als prozessanalytische Technologie (PAT) be-

zeichnet wird, kann zu verbesserter und planbarer Produktqualität, optimalem Einsatz der Rohmaterialien, weniger Abfall und damit zu höherem Gewinn führen.

MÅGE et al. (2013) führten eine Strategie der automatischen Sortierung an der Linie von Fleischabschnitten in Chargen mit vordefiniertem Fettgehalt ein. Fettgehalt und Gewicht jedes einzelnen Stückes wurden gemessen. Mit einem Algorithmus auf der Grundlage sogenannter Wunschfunktionen war es möglich, die Auswahl der Fleischstücke zu optimieren, um die gewünschten Fettwerte in zwei oder mehr Chargen zu erreichen. Bei dieser Studie wurde die NIR zur Schätzung des Fettes in den sehr unterschiedlichen Stücken direkt am Band eingesetzt. Dies führte zu großen Vorhersagefehlern pro Abschnitt (9,2 Prozentpunkte), was wiederum zu systematischen Fehlern bei der Fettschätzung der Chargen führte. Chargen mit wenig Fettanteil wurden unterschätzt, das heißt, sie enthielten mehr Fett als geschätzt, während Chargen mit hohem Fettanteil überschätzt wurden. Es wurde vorgeschlagen, dass diese systematischen Fehler durch verbesserte Genauigkeit der Fettschätzung reduziert oder ganz verhindert werden könnten.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist das Testen des prozessanalytischen Ansatzes von MÅGE et al. (2013) an intakten Schweinefleischabschnitten in einer Einstellung, bei der die Fettschätzungen an der Linie pro Abschnitt genauer waren. Es wurde dasselbe NIR-System verwendet, aber die Abschnitte wurden in kleinere Stücke zerteilt, um eine größere Anzahl repräsentativer Spektralmessungen zu erhalten. Die Autoren wollten feststellen, inwieweit das System Zielfettgehalte erreichen kann und wie genau die Fettschätzung pro Charge ist. Ebenso wollten die Autoren erklären und zeigen, welche Flexibilität diese Art von PAT den Fleischproduzenten bieten kann. Alle Daten wurden unter Industriebedingungen in einem Pilotbetrieb erhoben, und zum Testen verschiedener Sortiersysteme wurden Computersimulationen eingesetzt.

Materialien und Methoden

Alle Experimente erfolgten in einem kleinen Fleischzerlegebetrieb mit einem Förderband für die Abschnitte und einem NIR-System, das über dem Band installiert war.

Die Stücke wurden aus verschiedenen Teilen der Schweine-schlachtkörper geschnitten mit dem Ziel, einen Fettgehalt von sehr mager bis sehr fett zu erreichen. Die Stücke wurden in Normalgröße geschnitten und in Proben von etwa 2 – 4 kg portioniert. Große und sehr unterschiedliche Abschnitte wurden von Hand in kleinere Stücke von typischerweise 10 x 10 x 5 cm zerteilt. 92 derartige Proben wurden vorbereitet und mit dem NIR-System gescannt.

Jede Probe wurde viermal gescannt an verschiedenen Seiten. Das heißt, die Proben wurden zwischen den Messungen vermischt oder umgedreht. Die Probenahme endete schließlich mit 368 NIR-Messungen. Jede Probe wurde gewogen, was ein Gesamtgewicht von 226,8 kg Schweinefleisch ergab. Danach wurde jede Probe homogenisiert und der Fettgehalt wurde an zwei Teilstichproben zweifach bestimmt mit einem Foss FoodScan System (Foss, Hillerød, Dänemark).

Das NIR-System am Band war ein QVision500 (Tomra Sorting Solution, Leuven, Belgien), ein industrieller Scanner zur hyperspektralen Bildanalyse für die direkte Messung des Fettgehalts in Fleisch auf dem Förderband. Das System war bereits kalibriert für die Fettbestimmung in Schweinefleischabschnitten. Jede Messung dauerte etwa eine Sekunde. Da jede Probe viermal gescannt wurde, erhielt man pro Stichprobe vier Schätzwerte zum Fettgehalt, die dann in den darauf folgenden Simulationen verwendet wurden.

Sortiersimulationen

Das Sortieren kann als Multi-Reaktions-Optimierungsproblem angesehen werden, wobei die Fettgehaltswerte in den verschiedenen Chargen die Reaktionen sind. Optimierungsprobleme mit Mehr-

fachreaktionen können unter Anwendung von Wunschfunktionen gelöst werden (HARRINGTON, 1965). Der Sortieralgorithmus zur Lösung dieser besonderen Aufgabe wird detailliert von MÅGE et al., (2013) beschrieben. Die Eingaben in den Algorithmus sind Fettgehalt und Gewicht jeder Probe in einem Materialfluss. Auf der Grundlage des geschätzten aktuellen Status jeder Charge wird der Algorithmus entscheiden, für welche Charge der aktuelle Abschnitt bestimmt ist. Der Algorithmus ist schnell und kann an der Linie in Echtzeit arbeiten.

Bevor das Sortieren beginnt, sind die Haupteinstellungen zu wählen:

- Anzahl der zu produzierenden Chargen
- Ein Zielfettgehalt für jede Charge
- Eine obere und untere Fettgrenze für jede Charge. Das heißt, es können entweder strikte Grenzen dicht am Zielwert gewählt werden oder weiter gefasste Grenzen, die größere Schwankungen rund um den Zielwert erlauben.
- Ein Steilheitsparameter für die Wunschfunktion. Eine hohe Zahl (z.B. 10) favorisierter Lösungen sehr nah am Zielfettgehalt, während eine niedrige Zahl (z.B. 0,01) ein ungefähr gleiches Gewicht für alle Lösungen im definierten Bereich gibt.

In den folgenden Beispielen haben die Autoren einen Wert von 5 verwendet. Es ist auch möglich, für jede Seite des Zielwertes unterschiedliche Steilheitswerte einzusetzen.

Zusätzliche Einschränkungen können bei Bedarf gewählt werden:

- Maximal- und Minimalfettgehalt pro Abschnitt, der in jede Charge geht. Zum Beispiel kann für eine Magercharge festgelegt werden, dass die Abschnitte (Portionen) mit einem Fettgehalt über 40% nicht zugelassen sind.
- Ziele für die Gesamtfleischmenge in jeder Charge. In einigen Fällen gibt der Sortieralgorithmus die Mehrheit der Proben in dieselbe Charge. Falls der Markt größere Mengen anderer Chargen verlangt, ist es möglich, zusätzliche Einschränkungen zu definieren, um die Produktion in die gewünschte Richtung zu lenken.
- Ziele oder Bereiche anderer gemessener Qualitätsparameter, wie zum Beispiel Bindegewebe.

Jede zusätzliche Einschränkung geht natürlich zu Lasten des Hauptziels, nämlich der Optimierung des Fettgehalts. Dies bedeutet, dass die Abweichung vom Ziel normalerweise bei jeder zusätzlichen Einschränkung größer sein wird.

Für die Simulationen behandelten die Autoren die 368 NIR-Fettschätzungen der 92 Proben als 368 Einzelproben. Dies ist gerechtfertigt durch die Tatsache, dass das NIR-Instrument hauptsächlich die Oberfläche misst und aufgrund der Mischung die Oberfläche bei allen 368 Messungen unterschiedlich war. Mit den entsprechenden Gewichten ergaben die Fettschätzungen die Grundgesamtheit. In jeder Simulation sortierten die Autoren 1000 kg Fleisch, und der Probenfluss wurde gebildet durch Zufallsauswahl (mit Ersatz) aus der Grundgesamtheit. Die Ersatzmethode wurde gewählt, um unabhängige Proben zu erhalten. Mit den Gewichten und dem tatsächlichen Fettgehalt für jeden Abschnitt war es möglich, den aktuell geschätzten und tatsächlichen Fettgehalt in jeder Charge während des Sortierens zu errechnen und damit sowohl den Fortschritt jeder Charge als auch das Endergebnis zu bewerten. Durch $N = 1000$ Wiederholungen jeder Simulation konnten die Autoren die Durchschnittsleistung der Methode sowohl hinsichtlich der Abweichung vom Ziel als auch der Genauigkeit der Fettschätzung beurteilen. Die Genauigkeit wird durch die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) dargestellt:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\text{angestrebter Fettgehalt in der Wiederholung } n - \text{Originalfett in der Wiederholung } n)^2}{N}}$$

Ergebnisse und Diskussion

Der Fettgehalt in den Proben lag im Bereich von 4,5 bis 80,1% und das Probengewicht im Bereich von 1,27 bis 3,28 kg. Die Genauigkeit der Fettschätzungen durch das NIR-System ist in Abbildung 1 angegeben. Alle vier Schätzungen pro Probe sind gezeigt, und es ist klar, dass bei einigen der Proben die Abweichung in der Fettschätzung sehr groß war. Die Probe mit der größten Abweichung hatte die Vorhersagewerte 14,4%, 23,4%, 25,1% und 64,5%, wohingegen der tatsächliche Fettgehalt 25,1% betrug. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Probe sehr heterogen war: an einer Seite mager und an der anderen fett.

Der durchschnittliche Vorhersagefehler betrug 5,0%, was verhältnismäßig hoch ist. Dies war erwartet worden, da die Proben heterogen waren und das NIR-System hauptsächlich die oberste Schicht jeder Probe maß. Dieser Vorhersagefehler pro Abschnitt/Portion der Abschnitte war nichtsdestoweniger niedriger als der von WOLD et al. (2011) und MÅGE et al. (2013) bei intakten Abschnitten erhaltene Wert (8,4% bzw. 9,2%). Wesentlich geringere NIR-Vorhersagefehler für Fett in Fleisch erhält man bei Hackfleisch (0,82 – 1,49%, TØGERSEN et al., 1999) oder wenn zum Beispiel der Mittelwert einer 100-kg-Charge Abschnitte gebildet wird (0,6%, WOLD et al., 2011).

Nachfolgend werden Ergebnisse aus vier unterschiedlichen simulierten Beispielen an Sortierverfahren dargestellt, um die möglichen Vorteile und einige wenige inhärente Beschränkungen aufzuzeigen. Die Beispiele sind schematisch in den Abbildungen 2a, b, c, d dargestellt und so ausgelegt, dass sie die unterschiedlichen Eigenschaften des Systems beleuchten:

- Beispiel 1 illustriert die Vielseitigkeit hinsichtlich wechselnder Zielwerte.
- Beispiel 2 zeigt, wie das System mit Unterschieden im Rohmaterialfluss umgehen kann.
- Beispiel 3 zeigt die Anwendung einer zusätzlichen Einschränkung beim Chargengewicht.
- Beispiel 4 beschreibt eine mögliche Systemerweiterung, um auch die Menge an Bindegewebe steuern zu können.

Beispiel 1

Viele Fleisch verarbeitende Betriebe produzieren Chargen von Abschnitten mit Fettgehalten typischerweise um 10, 20, 30%, aber auch mit hohen Fettgehalten. Die exakten Ziele für den Fettanteil können

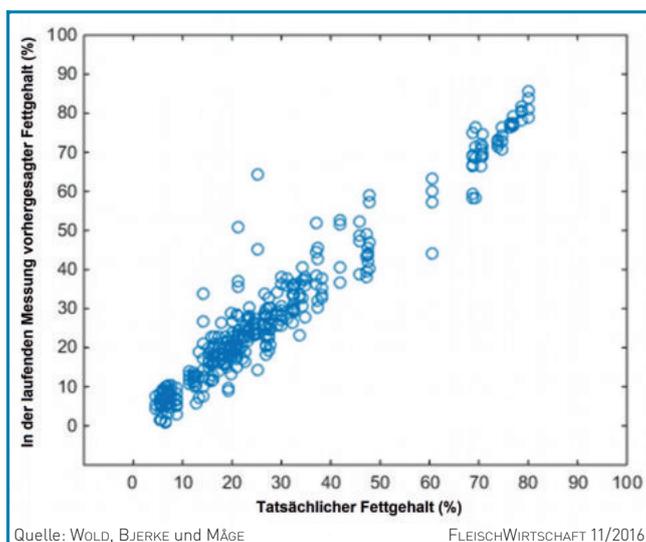


Abb.1: Korrelation zwischen dem tatsächlichen und dem am Band vorhergesagten Fettgehalt bei den 92 Portionen Fleischabschnitten
Fig. 1: Correlation between true and on-line predicted fat content for the 92 portions of meat trimmings.

von Ort zu Ort oder von Tag zu Tag variieren. Tagesziele könnten 10, 20, 30 und 60% sein, am nächsten Tag dann zum Beispiel 12, 18, 28 und 60%, je nach Kundenwünschen. Für beide Fälle haben wir die Chargen mit folgenden Einschränkungen belegt:

- Bei den drei Chargen mit niedrigem Fettanteil wurde eine Abweichung von 1%-Punkt vom Zielwert akzeptiert, für die Charge mit einem hohen Fettanteil dagegen eine 3%ige Abweichung.
- In den beiden Chargen mit dem niedrigsten Fettgehalt wurden Abschnitte mit einem Fettgehalt über 40% nicht akzeptiert.

Die durchschnittlichen Ergebnisse bei 1000 Wiederholungen dieser beiden Fälle sind in Abbildung 2a dargestellt. Bei den Chargen mit niedrigem Fettgehalt (10 – 20%) war der tatsächliche Fettgehalt immer leicht höher als der geschätzte, während die Chargen mit hohem Fettgehalt (28 – 60%) leicht überschätzt waren. Dieser systematische Fehler beruht auf einem inhärenten Effekt, der ebenfalls von MÅGE et al. (2013) erörtert wurde: Solange bei den Abschnitten Vorhersagefehler vorliegen, werden Chargen mit niedrigem Fettgehalt immer unterschätzt und Chargen mit hohem Fettgehalt dementsprechend überschätzt. Dies ist den heterogenen Proben zuzuschreiben. Ein Abschnitt, der mager sein soll und deshalb in eine Charge mit niedrigem Fettgehalt sortiert wird, hat manchmal tatsächlich einen viel höheren Fettgehalt. Jedoch wird der tatsächliche Wert niemals viel niedriger sein, und dies führt zu den systematischen Verzerrungen, die bei den Simulationen beobachtet wurden.

Trotz dieser inhärenten systematischen Verzerrung waren die Vorhersagefehler und Abweichungen vom Zielwert verhältnismäßig gering (Abb. 2a). Ein RMSE-Wert unter 1% bei den Chargen mit dem niedrigsten Fettgehalt zeigt eine gute Genauigkeit der Fetteinschätzung und stellt eine signifikante Verringerung gegenüber dem Fehler bei den Proben dar (5%). Die Unterschiede zwischen Schätzwert und Chargenziel waren praktisch null, was anzeigt, dass der Sortieralgorithmus sehr gut funktioniert.

Wie in Abbildung 2a gezeigt, gab es bei den Chargenendgewichten einige Schwankungen, aber insgesamt war die Größe aller Chargen ziemlich gleichmäßig. Falls eine Probe nicht in eine der Chargen gegeben werden kann, ohne eine oder mehrere Einschränkungen zu verletzen, wird sie in einer „unsortierten“ Charge gesammelt. In diesem ersten Beispiel wurden nur sehr wenige Proben nicht in eine der Kategorien (durchschnittlich 1 – 2 kg) einsortiert.

Abbildung 3 stellt einen zufällig gewählten Sortierprozess (aus den 1000 Wiederholungen) des ersten Falles dar und zeigt die Entwicklung des Fettgehalts in jeder Charge als eine Funktion des Gesamtgewichts. Man kann feststellen, dass die Optimierungsroutine etwa 50 kg Fleisch in jede Charge sortieren muss, bevor sich die geschätzten Fettgehalte in den spezifizierten Bereichen stabilisieren. Ab dann variiert der Fettgehalt während der Erzeugung der Chargen nur leicht, aber der tatsächliche Fettgehalt liegt bei allen Chargen meist in den spezifizierten Bereichen. Dasselbe Muster zeigt sich auch für die zweiten Zielwerteinstellungen (nicht dargestellt).

Beispiel 2

Manche Verarbeitungsbetriebe liefern typischerweise zwei Produkte: ein Niedrigfettprodukt mit strikten Grenzen beim Fettgehalt und ein Hochfettprodukt mit geringeren Einschränkungen. Die Fettcharge kann zum Beispiel zur Wurstherstellung verwendet werden, wo der Fettgehalt variieren kann, aber es ist wichtig, den tatsächlichen Fettgehalt zu kennen. Zur Veranschaulichung dieses Falles haben die Autoren ein Sortierregime mit zwei Chargen mit den Zielwerten 12% und 30% eingerichtet. Bei der Niedrigfettcharge wurde eine Abweichung von nur 1 Prozentpunkt von der Zielvorgabe akzeptiert, bei der Fettcharge –5 bis +15%. Zusätzlich durfte die 12%-Charge keine Abschnitte mit einem Fettgehalt über 40% und die 30%-Charge keine Proben unter 15% enthalten. Zwei Simulationsreihen wurden durchgeführt, um zu untersuchen, wie

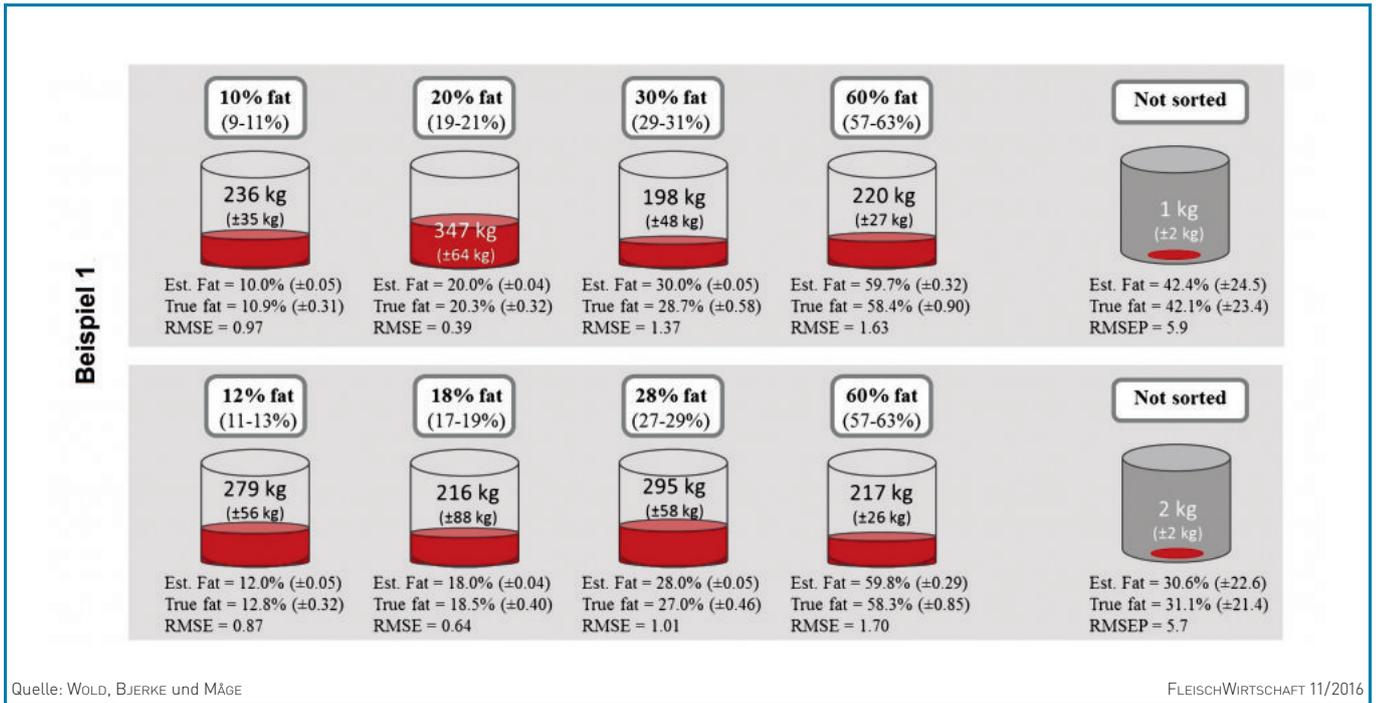


Abb. 2a: Übersicht der Ergebnisse aus Beispiel 1

Fig. 2a: Overview of results from Example 1

(Est. Fat = angestrebter Fettgehalt; True fat = tatsächlicher Fettgehalt; Not sorted = nicht sortiert)

unterschiedliche Rohmaterialflüsse sich auf das Sortieren auswirken:

- Alle verfügbaren Abschnitte, was einen durchschnittlichen Fettgehalt von 28% ergab.
- Nur Abschnitte mit einem Fettgehalt von unter 60%, was einen durchschnittlichen Fettgehalt von 21% ergab.

Die Durchschnittswerte bei 1000 Wiederholungen jedes Rohmaterialflusses sind in Abbildung 2b angegeben. In beiden Fällen liegen die Niedrigfettchargen sehr eng beim Zielfettgehalt, während die

zwei Fettchargen am Ende ziemlich unterschiedliche Fettgehalte aufweisen. Die durchschnittliche Differenz zwischen dem tatsächlichen und dem Zielfettgehalt bei der Niedrigfettcharge betrug 0,81 und 0,86 für die beiden Rohmaterialquellen, was bedeutet, dass die Charge in beiden Fällen gut in den gesetzten Grenzen lag. Die durchschnittliche RMSE bei der Fettcharge betrug in beiden Fällen 0,89 und 1,19. Dies zeigt, dass die Anwender verhältnismäßig genau wissen, wie viel Fett in der Charge ist, obwohl der Wert weit vom Ziel entfernt ist.

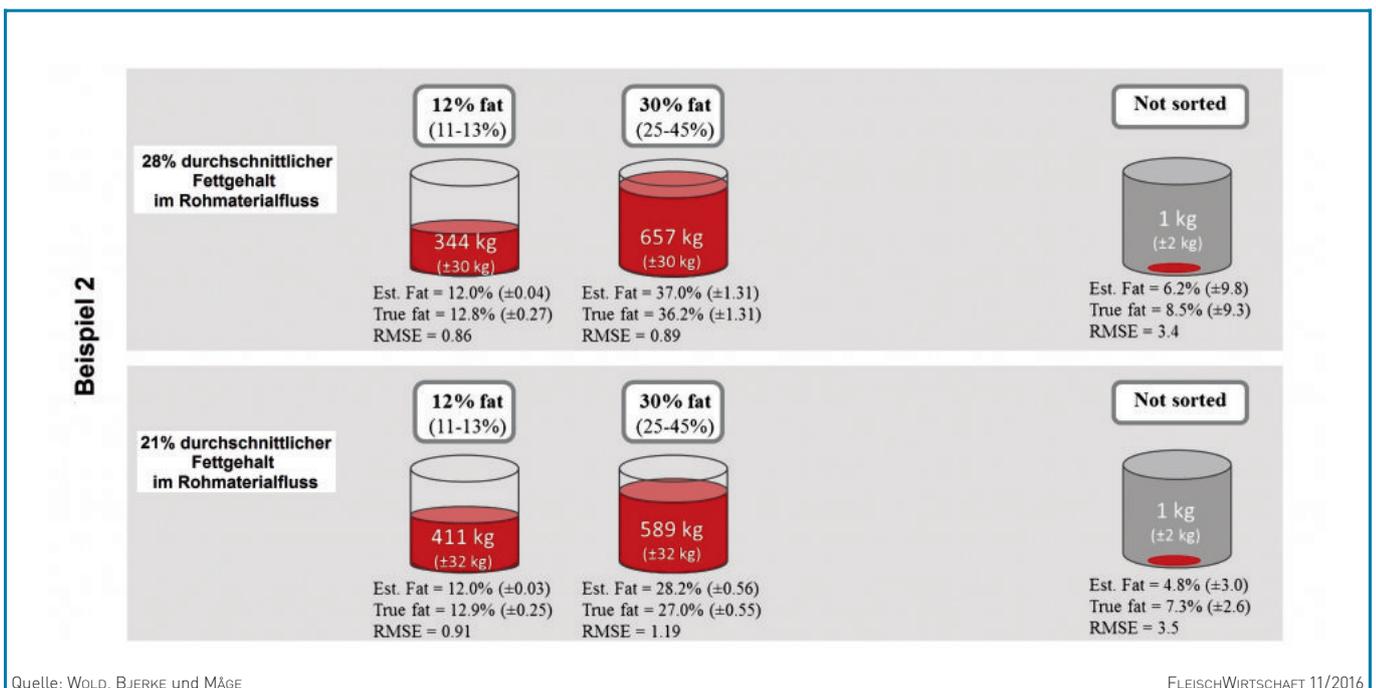


Abb. 2b: Übersicht der Ergebnisse aus Beispiel 2

Fig. 2b: Overview of results from Example 2

(Est. Fat = angestrebter Fettgehalt; True fat = tatsächliches Fett; Not sorted = nicht sortiert)

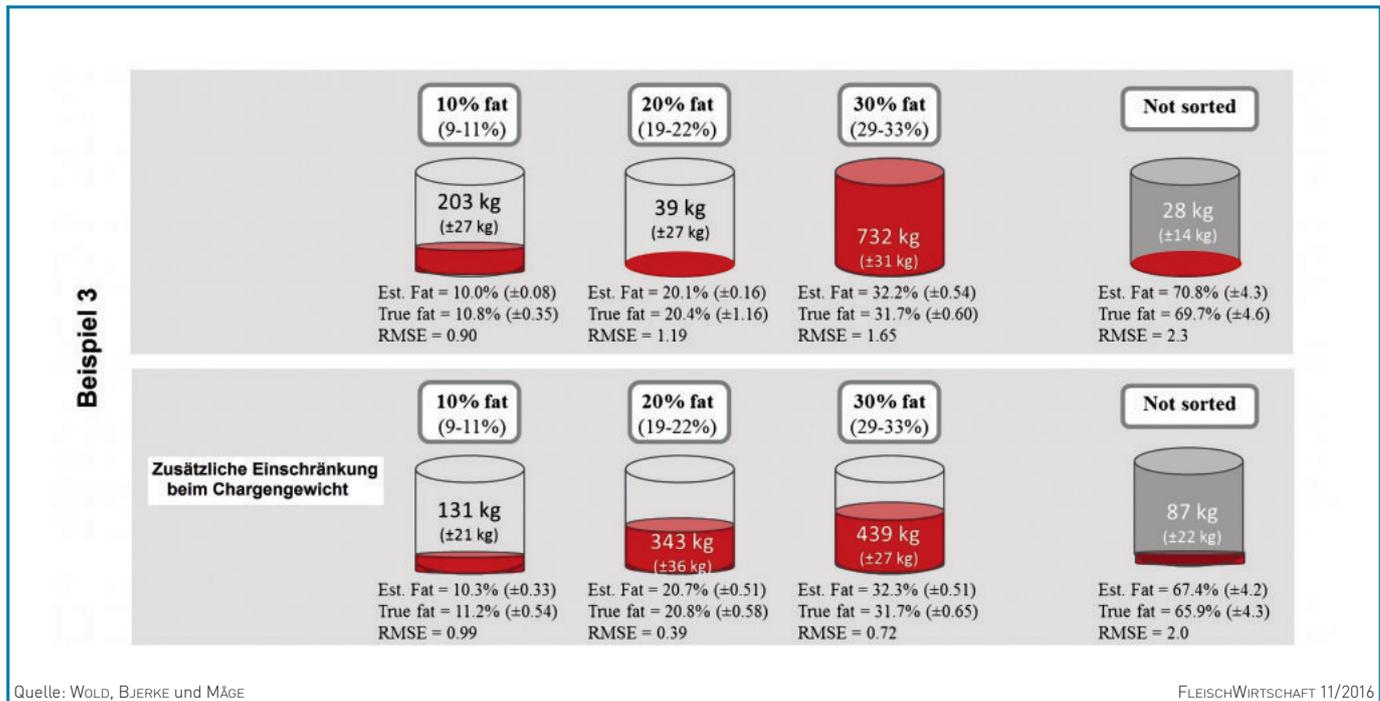


Abb. 2c: Übersicht der Ergebnisse aus Beispiel 3

Fig. 2c: Overview of results from Example 3

(Est. Fat = angestrebter Fettgehalt; True fat = tatsächliches Fett; Not sorted = nicht sortiert)

Beispiel 3

Im nächsten Beispiel stellten die Autoren nur drei Chargen mit Ziel-fettgehalten von 10, 20 und 30% her.

In diesem Fall setzten die Autoren für die Chargen die folgenden Einschränkungen fest:

- Abweichungen von 1, 2 bzw. 3 Prozentpunkten über dem Ziel wurden bei den Chargen mit 10, 20 und 30% akzeptiert, während bei allen Chargen eine Abweichung von 1 Prozentpunkt unter dem Ziel akzeptiert wurde.
- In den 10- und 20%-Chargen waren Abschnitte mit einem Fettgehalt über 40 bzw. 50% nicht zugelassen, und in der 30%-Charge waren Proben unter 10% nicht zugelassen.

Bei 1000 Simulationen dieses Falles wurden durchschnittlich 28 kg Fleisch nicht sortiert; das heißt, sie passten in keine der Chargen (Abb. 2c). Dies zeigt, dass das vorhandene Fleisch eine Fettverteilung aufwies, die nicht gut zu den gewünschten Zielwerten passte. Die Fleischmenge in der 20%-Charge war auch in den meisten Simulationen sehr gering (durchschnittlich 39 kg), während die 10%- und 30%-Chargen im Durchschnitt 203 bzw. 732 kg enthielten. Um die

ungleichen Chargengrößen zu kompensieren, wurde ein zusätzliches Element in die Wunschfunktion eingebaut, um die Chargengrößen einander anzugleichen. Diese Ergebnisse sind auch in Abbildung 2c angegeben. Die Chargengrößen sind tatsächlich gleichmäßiger, auf Kosten leicht erhöhter Abweichungen vom Zielwert. Die Menge des nicht sortierten Fleisches nahm aufgrund der zusätzlichen Einschränkung ebenfalls auf durchschnittlich 87 kg zu.

Beispiel 4

In diesem Beispiel wird gezeigt, wie das System durch zusätzliche Messungen des Bindegewebes (CT) noch erweitert werden kann. Grundsätzlich kann der zur Fettmessung verwendete NIR-Scanner auch den CT-Gehalt schätzen, indem Oberflächenbereiche identifiziert werden, die eine weiße Farbe und wenig Fett aufweisen. Die Fläche dieses Bereichs (berechnet als Anteil der Gesamtfläche) kann als Schätzung des CT-Anteils in jedem Abschnitt dienen. Genau wie Fett ist auch Bindegewebe im Fleisch gleichmäßig verteilt, und Vorhersagefehler sind groß. Entsprechend den Fettschätzungen lässt sich die Genauigkeit vergrößern, indem die Abschnitte in kleinere

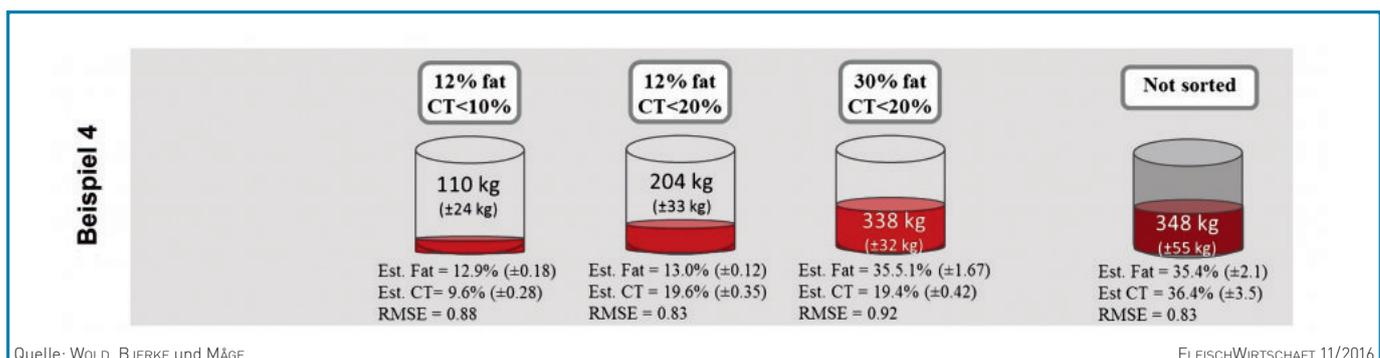


Abb. 2d: Übersicht der Ergebnisse aus Beispiel 4

Fig. 2d: Overview of results from Example 4

(Est. Fat = angestrebter Fettgehalt; Est. CT = angestrebter Bindegewebsgehalt; Not sorted = nicht sortiert)

Stücke geschnitten werden. Um diese Möglichkeit in einem Sortierregime zu veranschaulichen, simulierten die Autoren CT-Werte zwischen 0 und 90% (des Gesamtproteins) bei jedem Fleischabschnitt. Die CT-Werte wurden aus einer Verteilungsfunktion entnommen, die zu kleineren Werten verzerrt war (eine exponentielle Verteilungsfunktion mit $\lambda = 3$) und erneut linear auf Werte zwischen 0 und 90 skaliert wurde. Der mittlere CT-Wert war 25%. Die Autoren verwendeten dieselben Zielchargen wie in Beispiel 2 (12 und 30% Fett), aber die 12%-Charge war unterteilt in einen niedrigen und durchschnittlichen CT-Wert mit den Obergrenzen 10 bzw. 20%. Der obere CT-Grenzwert wurde auch für die Hochfettcharge auf 20% eingestellt. Die Ergebnisse von 1000 simulierten Sortierungen sind in Abbildung 2d dargestellt. Es wurden nur die geschätzten Fettwerte angegeben, da die Abweichungen vom tatsächlichen Fettwert denen in den vorherigen Beispielen entsprechen. Abbildung 2d zeigt, dass die Fett- und CT-Werte bei allen Chargen innerhalb der Zielgrenzen sind, aber der geschätzte Fettgehalt bei den Niedrigfettchargen sehr nah an der Obergrenze von 13% liegt. Die Menge des nicht sortierten Fleisches hat ebenfalls zugenommen, hauptsächlich wegen der hohen CT-Werte. Abbildung 4 zeigt den Fortschritt einer der 1000 Wiederholungen, und man sieht, dass sich sowohl der Fett- als auch der CT-Gehalt bei ungefähr 30 – 50 kg Chargengewicht stabilisieren, was den Ergebnissen aus Beispiel 1 entspricht.

Praktische Bedeutung

Diese Arbeit zeigt, wie automatische Systeme zum Sortieren intakter, nicht homogener Fleischabschnitte an der Linie den Weg ebnen für die flexible und kosteneffektive Produktion von Fleischchargen. Die Einführung dieser Sortieralgorithmen wäre für die Prozesskontrolle in der Fleischindustrie ein guter Schritt vorwärts hinsichtlich Gewinn, Fleischqualität und Logistik. Zusätzlich zu den sichtlich reduzierten Kosten für Arbeitskräfte und Zeitaufwand können derartige Systeme für die Fleischindustrie von Nutzen sein, da sie ihnen Folgendes ermöglicht:

■ **Lieferung nach Spezifikation**

Die beiden Fälle in Beispiel 1 veranschaulichen nur einen Teil der Flexibilität des Systems; das Umschalten zwischen einzelnen Ziel-fettgehalten ist einfach. Es ist keine Schulung am System erforderlich und sicherlich keine Ausbildung der Handarbeitskräfte. Die anderen Beispiele zeigen auch, dass jede beliebige Anzahl von Ziel-

chargen eingestellt werden kann, solange die Ziele zum vorhandenen Rohmaterial passen. Beispiel 4 beschreibt, wie sich das System erweitern lässt, um auch andere kritische Qualitätsmerkmale einzubeziehen, die direkt an der Linie gemessen werden können.

■ **Optimierter Einsatz der Rohmaterialien**

Beispiel 2 zeigt, wie unterschiedliche Anforderungen für unterschiedliche Chargen genutzt werden können, um das System unempfindlicher gegenüber Änderungen bei den Rohmaterialflüssen zu machen. Wenn eine der Kategorien fließende Grenzen hat, werden die anderen Chargen näher am Ziel liegen, selbst wenn sich das Rohmaterial ändert. Fließende Grenzen minimieren auch die Menge des nicht sortierten Fleisches.

■ **Verbesserung der Fleischqualität**

Derzeit erfolgt das Sortieren von Fleischabschnitten in der Industrie hauptsächlich durch einzelne Facharbeiter (Metzger). Die Chargen werden erst danach überprüft und bei Bedarf standardisiert (mit fetterem oder magerem Fleisch angeglichene). Der Standardisierungsschritt macht es erforderlich, das Fleisch zu zerkleinern und Unterstichproben im Labor zu messen. Die Schätzung des Fettgehalts direkt an der Linie kann diese Standardisierung ersetzen, und das Zerkleinern ist nicht mehr notwendig. Dadurch wird die erhöhte Wasserhaltekapazität der Abschnitte einen positiven Einfluss auf den Produktionsertrag und den Tropfsaftverlust im Einzelhandel haben.

■ **Erhalt eines korrekten Preises**

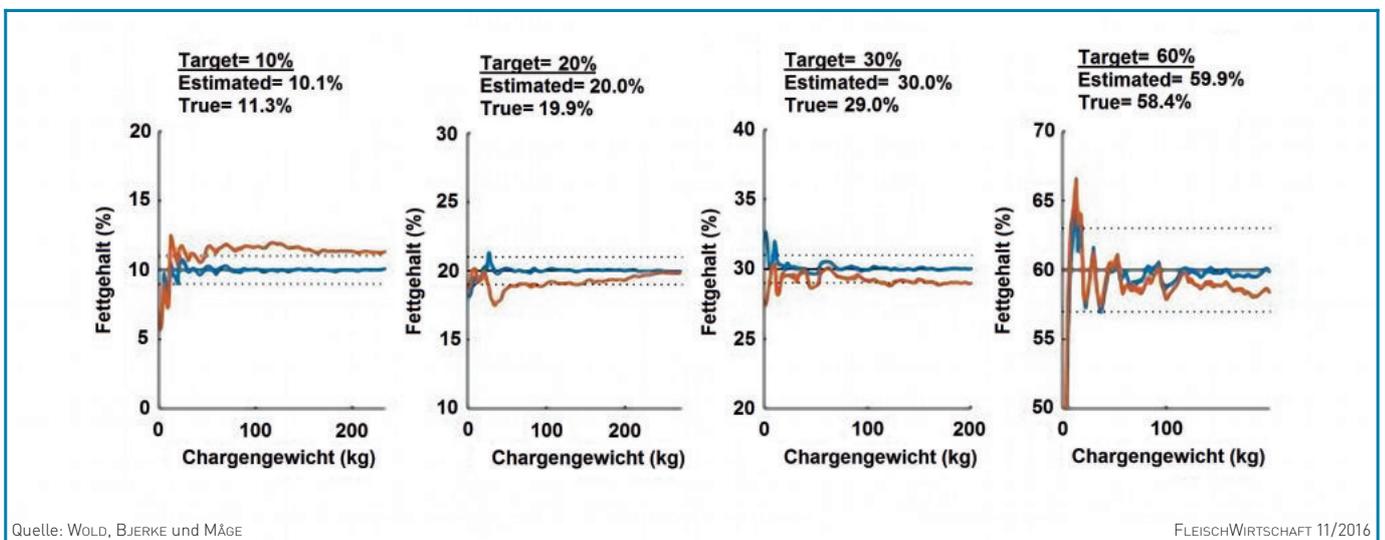
Der Preis steht oft in direktem Zusammenhang mit dem Fettgehalt; und mit diesem System ist es möglich, eine präzise Schätzung des Fettes ohne Standardisierung zu erhalten.

■ **Optimierte Wahl der Schnitttechniken**

Das System kann dazu genutzt werden, bessere und genauere Modelle zur geschätzten Ausbeute bei den unterschiedlichen Schnitttechniken zu erhalten, was wiederum eine indirekte Stimulierung für Rationalisierung und Kostenverringering darstellt.

■ **Anpassung der Produktion an Aufträge und Anforderungen**

Dies wird im Zerlegebetrieb die Rentabilität erhöhen und das Risiko verringern. Beispiel 3 zeigt, wie zusätzliche Einschränkungen dazu genutzt werden können, die Produktion hinsichtlich des Endgewichts der Chargen zu steuern. Es ist daher möglich, sowohl die Zielwerte als auch das Volumen auf die Marktforderungen abzustellen. Die Ziele und Einschränkungen müssen selbstverständlich bis zu einem gewissen Grad zum vorhandenen Rohmaterial passen, aber das



Quelle: WOLD, BJERKE und MÅGE

FLEISCHWIRTSCHAFT 11/2016

Abb. 3: Der sich ergebende Fettgehalt als Funktion des Chargengewichts für einen Sortierprozess aus Beispiel 1. Blaue und rote Linie stellen den angestrebten bzw. tatsächlichen Fettgehalt dar, während die gepunkteten Linien die im Sortieralgorithmus gewählten Ober- und Untergrenzen zeigen. (Target = Ziel; Estimated = angestrebte; True = tatsächlich)

Fig. 3: Evolving fat content as function of batch weight for one sorting process from Example 1. The blue and red line represent estimated and true fat content respectively, while the dotted lines show the upper and lower limits set in the sorting algorithm.

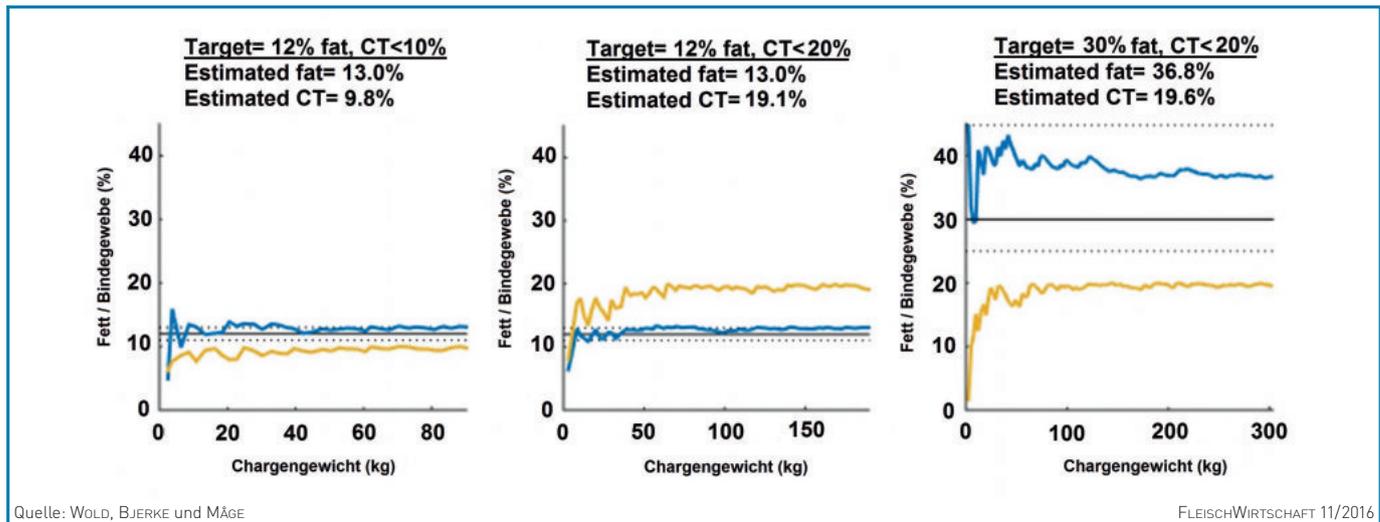


Abb. 4: Der sich ergebende Fett- und CT-Gehalt als Funktion des Chargengewichts für einen Sortierprozess aus Beispiel 4. Die blauen und gelben Linien stellen den angestrebten Fett- bzw. CT-Gehalt dar, während die gepunkteten Linien die Ober- und Untergrenzen für Fett zeigen. (Target = Ziel; CT = Bindegewebe; Estimated fat = angestrebter Fettgehalt; Estimated CT = angestrebter Bindegewebsgehalt)

Fig. 4: Evolving fat and CT content as function of batch weight for one sorting process from Example 4. The blue and yellow lines represent estimated fat and CT content respectively, while the dotted lines show the upper and lower limits for fat.

System lässt sich auf höhere oder niedrigere Fettgrenzwerte einstellen, um das Volumen zu erhöhen.

Ein geringfügiger Nachteil bei dem vorgestellten System ist die moderate aber systematische Abweichung zwischen tatsächlichem und geschätztem Fettgehalt, was darauf zurückzuführen ist, dass der NIR-Sensor nicht die gesamte Probe erfasst. Das Zerkleinern der Abschnitte verbesserte die Messgenauigkeit bei den Abschnitten im Vergleich zu MÅGE et al. (2013) und gleichzeitig auch die Übereinstimmung mit dem Ziel und die Fettschätzgenauigkeit der sich ergebenden Chargen. Das Sortiersystem kann natürlich stattdessen mit einem Röntgensystem eingesetzt werden, wenn man mit diesen Systemen genauere Fettschätzungen erhält. Mit genaueren Schätzungen der Abschnitte geht die Abweichung gegen null, und die systematische Unterschätzung der Niedrigfettchargen sowie die Überschätzung der Hochfettchargen werden beseitigt. In diesem Fall beruhen die Abweichungen vom Ziel hauptsächlich auf Unterschieden zwischen den Rohmaterialströmen und den Zielwerten und anderen Einschränkungen.

Danksagung

Die vorgestellte Forschungsarbeit wurde finanziert durch den Norwegischen Forschungsrat mit dem Projekt MeatAutoSort (225349/E40) und dem Projekt Food Imaging (225347/F40), finanziert durch die Norwegische Stiftung für Landwirtschaft und Lebensmittelforschung.

Literatur

- HARRINGTON, E.C. (1965): The Desirability Function. *Industrial Quality Control* 21 (10), 494–498.
- HILDRUM, K.I., J.P. WOLD, V.H. SEGTMAN, J.P. RENOU und E. DUFOUR (2006): New spectroscopic techniques for on-line monitoring of meat quality. In: L.M. Nolet and F. Toldra (Eds.), *Book On Advanced Technologies for Meat Processing*, CRC Press, Taylor and Francis Group.
- MÅGE I., J.P. WOLD, F. Bjerke und V. SEGTMAN (2013): On-line sorting of meat trimmings into targeted fat categories. *J of Food Engineering* 115 (3), 306–313.
- O'FARRELL, M., J.P. WOLD, M. HØY, J. TSCHUDI und H. SCHULERUD (2010): On-line fat content classification of inhomogeneous pork trimmings using multispectral near infrared interphase imaging. *Journal of Near-Infrared Spectroscopy* 18, 135–146.
- TØGERSEN, G., T. ISAKSSON, B.N. NILSEN, E.A. BAKKER und K.I. HILDRUM (1999): On-line NIR analysis of fat, water and protein in industrial scale ground meat batches. *Meat Science* 51, 97–102.
- WOLD, J.P., M. O'FARRELL, M. HØY und J. TSCHUDI (2011): On-line determination and control of fat content in batches of beef trimmings by NIR imaging spectroscopy. *Meat Science* 89, 317–324

Anschriften der Verfasser

Jens Petter Wold (Korrespondenzautor: jens.petter.wold@nofima.no) und Ingrid Måge, Nofima – Norwegian Institute of Food, Fisheries and Aquaculture Research, Osloveien 1, 1430 Ås, Norwegen, und Frøydis Bjerke, Norwegian Meat and Poultry Research Center, P.O. Box 396 Okern, 0513 Oslo, Norwegen

Summary

Automatic control of fat content in multiple batches of meat trimmings by process analytical technology

J. P. Wold and Ingrid Måge – Ås/Norway; Frøydis Bjerke – Oslo/Norway

Control of fat content | Optimization | Sorting | Automatic system | Meat trimmings

Large shares of the pork and beef carcasses ends up as trimmings. Batches of trimmings are mainly valued by the fat content. Improved industrial control of fat content in these batches is therefore very important to secure stable quality and profitability in the industry. In this work the authors evaluated a novel strategy for automatic on-line sorting of meat trimmings into batches of predefined fat content. The optimization algorithm was based on so-called desirability functions and the input to the algorithm for each portion of trimmings is on-line measured weight and fat content. Ninety-two portions of pork trimmings (a total of 227 kg) spanning a fat range of 4.5% to 80.1% were scanned four times each with an on-line NIR system to obtain fat content estimates. All data were collected under industrial conditions in a pilot plant, and computer simulations were used to test four different sorting regimes. Results show that the sorting algorithm produces batches very close to target fat values; typical deviation is within 1%-point. The prediction error for fat at batch level was below $\pm 1.0\%$ -points for low fat batches and in the range 1.0–1.5%-points for high fat batches. The results demonstrate that automatic systems for on-line measurement and sorting of intact, inhomogeneous meat trimmings open up for flexible and cost-efficient production of meat batches.