



Modul 4.4



Möglichkeiten zur Überwachung der Produktqualität und Anpassung der Trocknungsbedingungen

Christian Kopp, Michael Bantle

Zugehörigkeit: SINTEF Energi AS + Thermal energy

Trondheim (Norway)

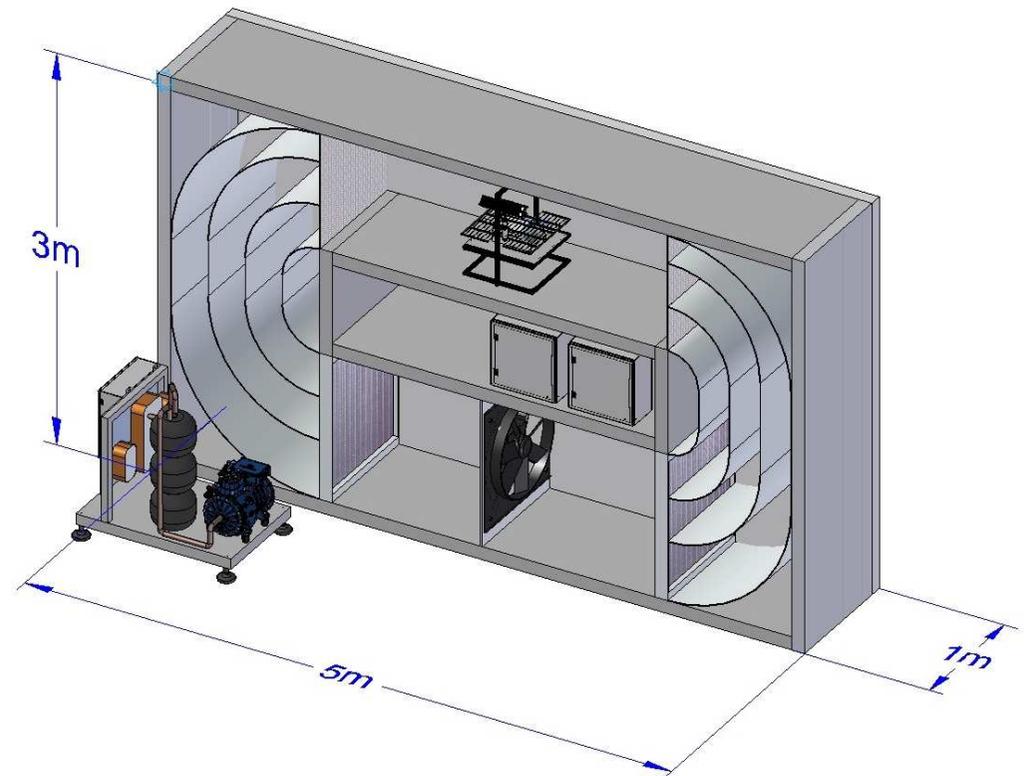
Christian.Kopp@Sintef.no

michael.Bantle@Sintef.no

Ausgangssituation

Mögliche Einstellungen

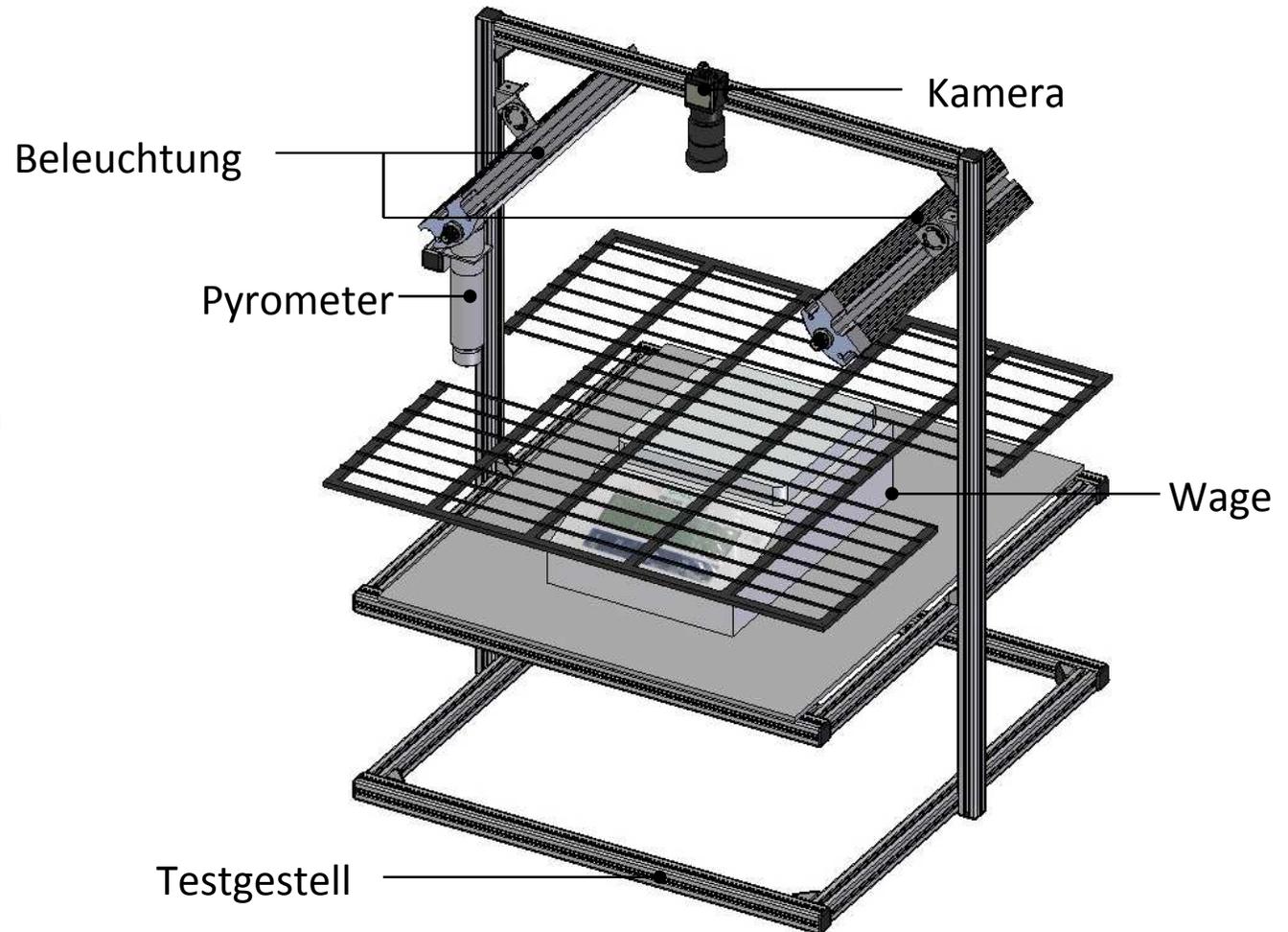
- Temperatur einstellen
- Luftgeschwindigkeit einstellen
- Glykoltemperatur einstellen
- Aufzeichnung der Temperatur
- Aufzeichnung der relativen Luftfeuchtigkeit
- Aufzeichnung der Luftgeschwindigkeit



Änderungen

Neue Sensoren

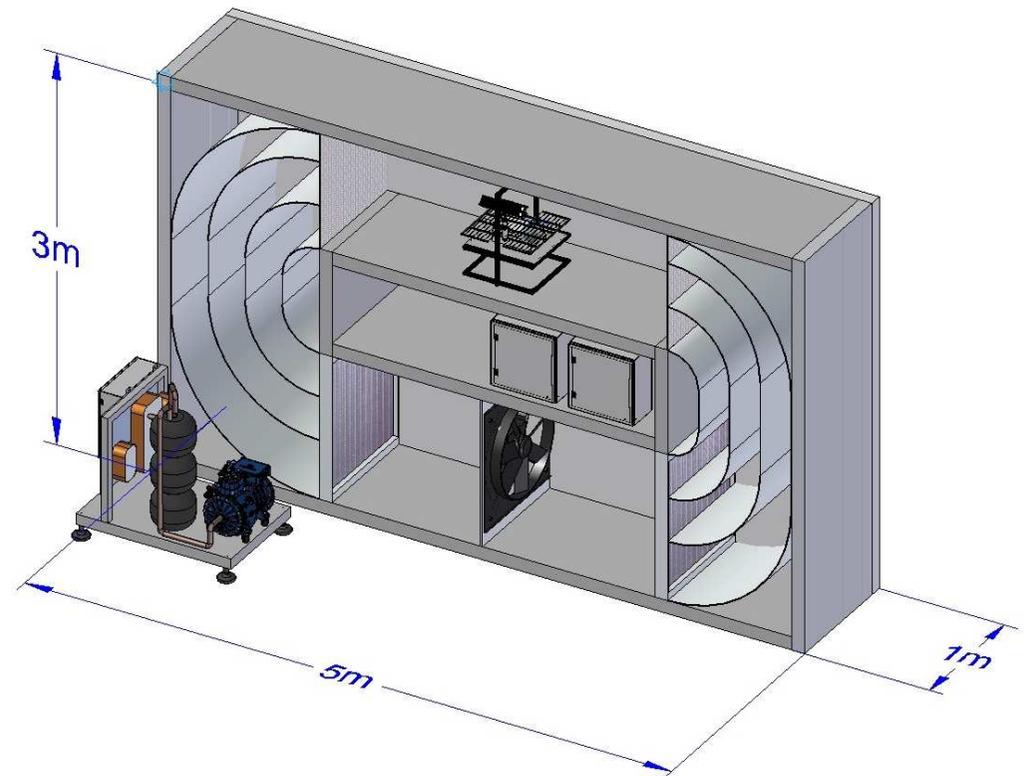
- Wage (Trocknungskinetik)
- Pyrometer (Oberflächentemperatur)
- Kamerasystem mit Beleuchtung (Farbwechsel, Schrumpfung und Verformung)



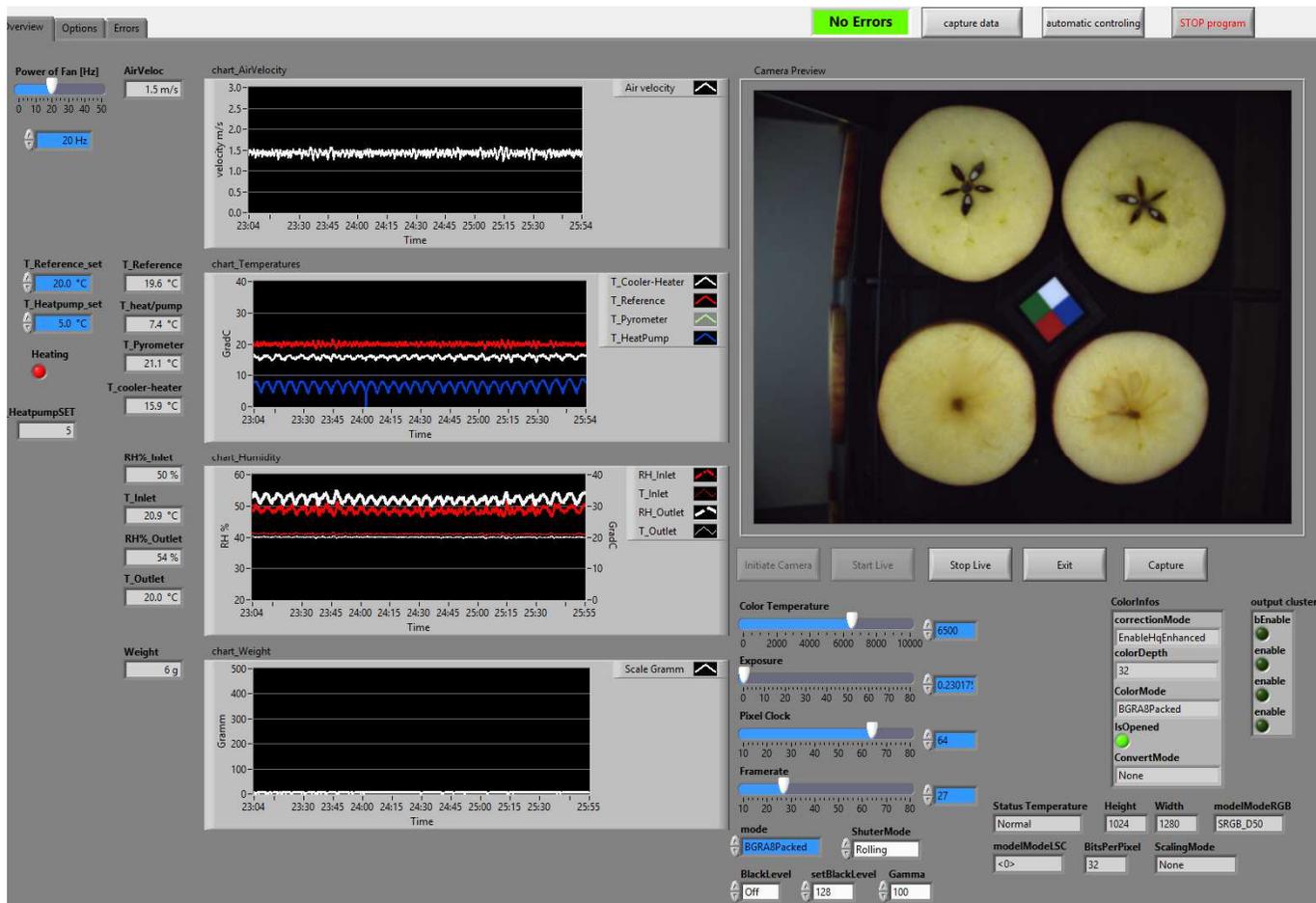
Änderungen

Neue features

- Grafische Benutzeroberfläche mit LabVIEW
- Regulierung von T, RH und Luftgeschwindigkeit
- Kontinuierliche Datenerfassung
- Keine Unterbrechung des Trocknungsprozesses
- Optische Parameter
- Eigener programmierbarer Trocknungsprozess



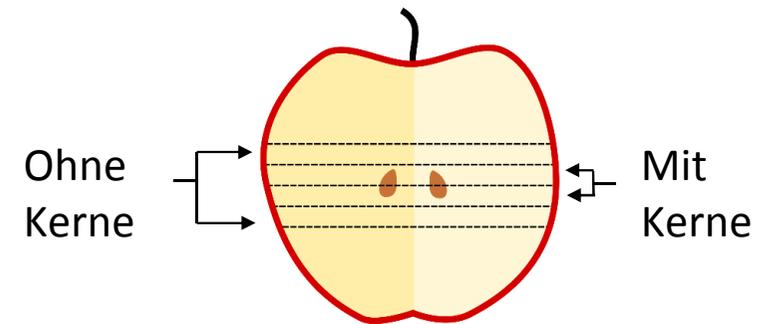
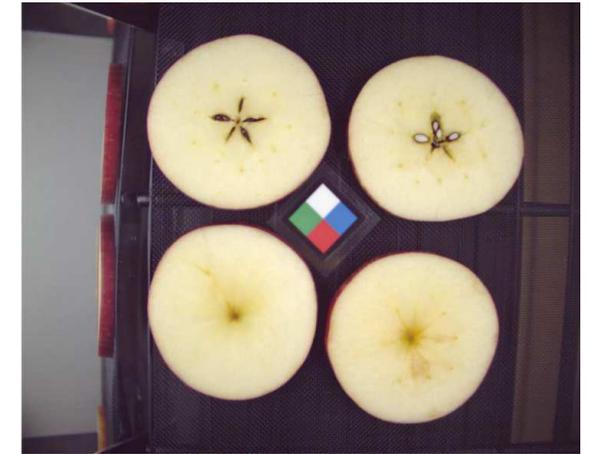
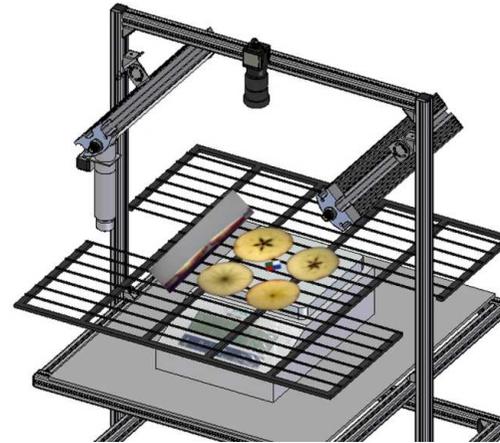
Änderungen (LabVIEW control)



Versuchsaufbau

Aufbau

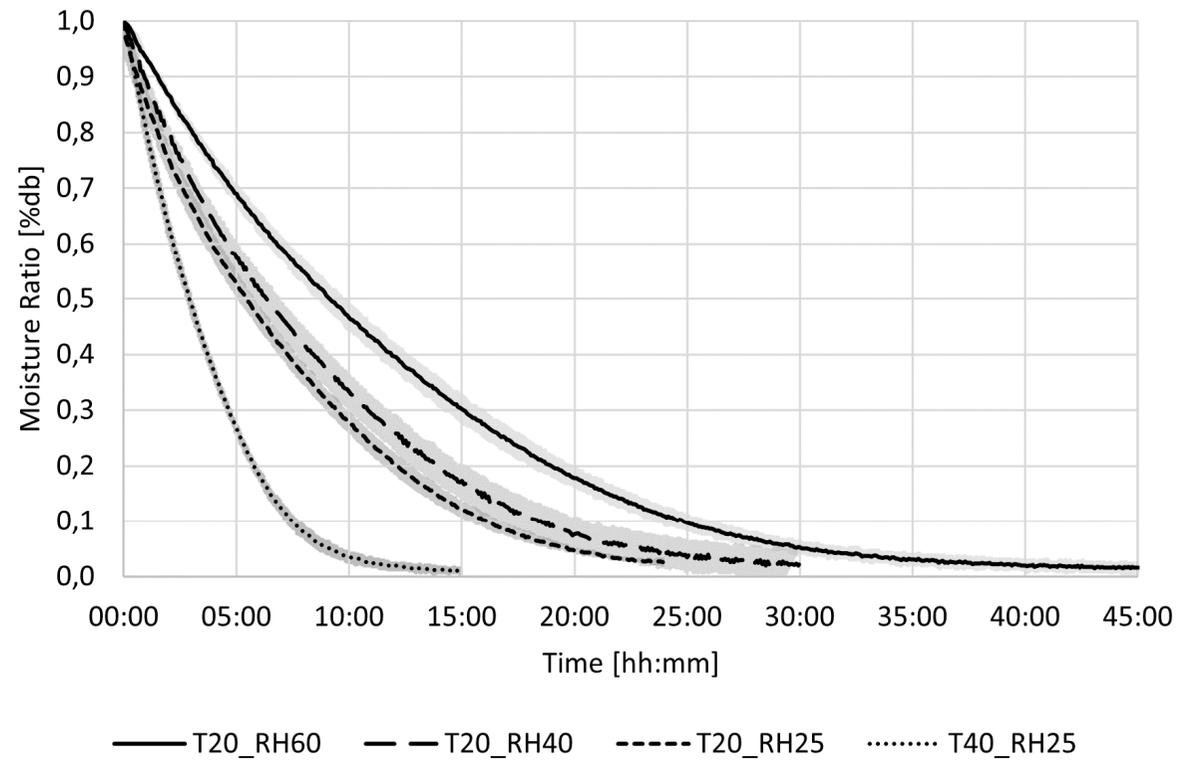
- Apfelscheiben, 5mm Dicke
- Ca. 500g Apfelscheiben auf dem Gitter
- 4 Apfelscheiben unter der Kamera
- Eine unter dem Pyrometer
- Jede Testreihe mindestens 3x



Ergebnisse Trocknungskinetik

Feuchtigkeitsverhältnis

- Trockensubstanz bestimmt mit Vakuum-Gefriertrocknung
- Equilibrium Moisture Content bestimmt mit Klimakammer (eine Woche Trocknen)

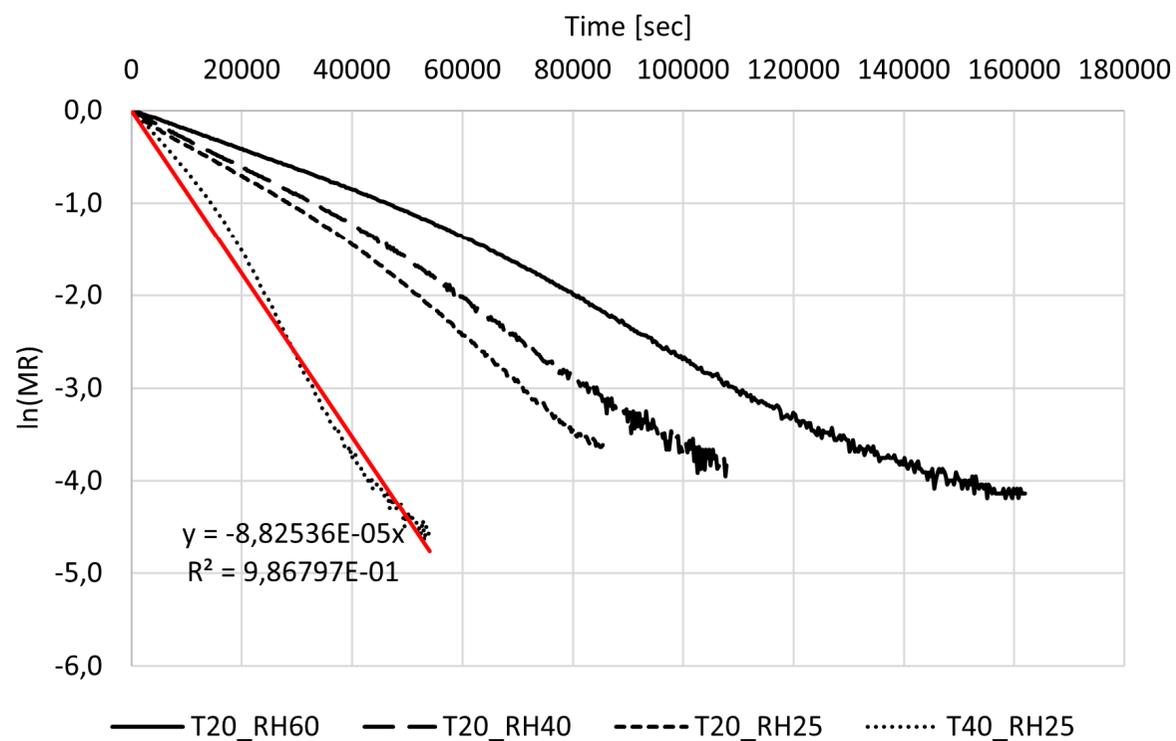


Ergebnisse Trocknungskinetik

Effektive Diffusionsfähigkeit [1]

	D_{eff} [m ² /s]
T20_RH60	2,7E-10
T20_RH40	3,6E-10
T20_RH25	4,1E-10
T40_RH25	8,9E-10

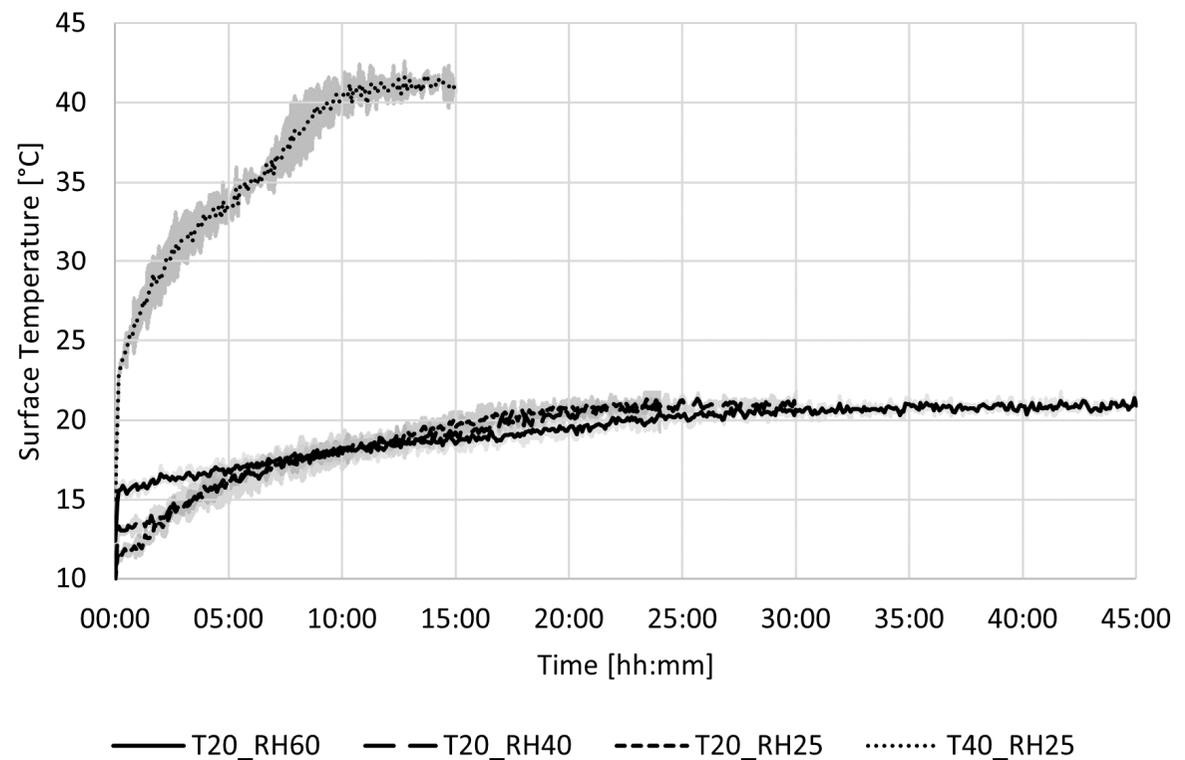
$$D_{eff} = - \left(\frac{4 \left(\frac{Dicke}{2} \right)^2}{\pi^2} \right) * (\text{Steigung der Linie})$$



Ergebnisse Trocknungskinetik

Oberflächentemperatur

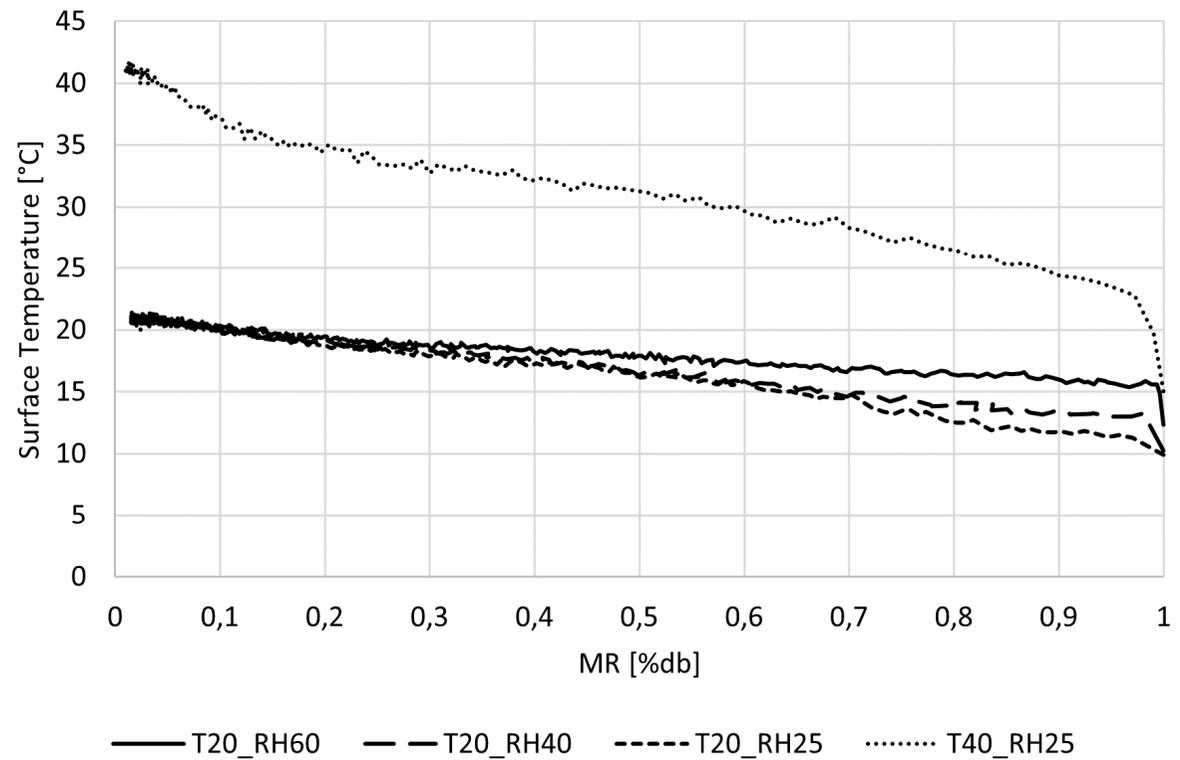
- Eine Apfelscheibe unter dem Pyrometer
- Durchschnitt von mindestens 3 Apfelscheiben



Ergebnisse Trocknungskinetik

Oberflächentemperatur

- Am Anfang aufwärmen (bei 8 ° C im Kühlschrank lagern)
- Linearer Anstieg mit MR

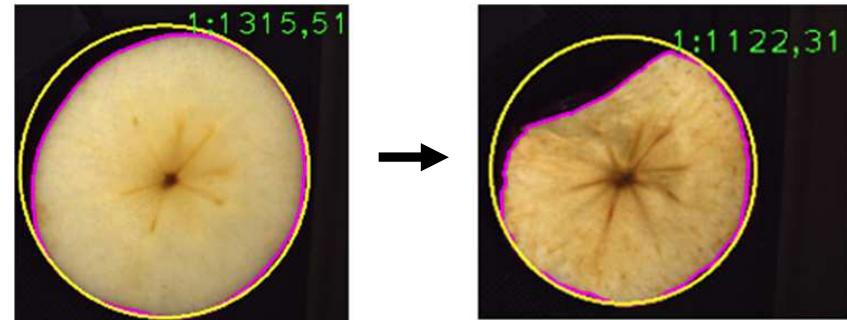


Optische Parameter (Schrumpfung und Verformung)

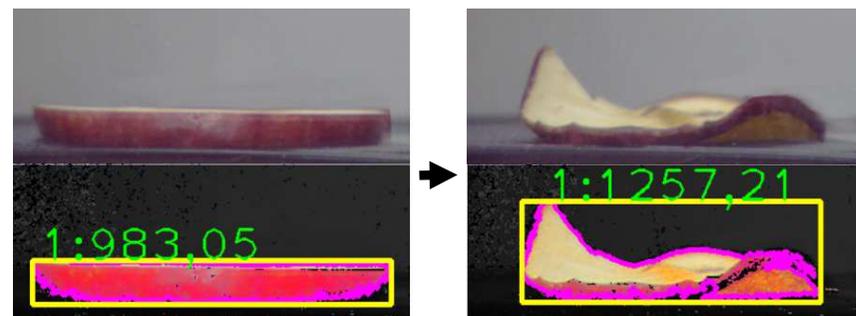
Messprinzipien

- Analysiert mit Java Tool und Open CV ^[2](bei 8 ° C im Kühlschrank lagern)
- Linearer Anstieg mit MR
- Schrumpfung bei $\frac{A_{\text{tatsächlich}}}{A_{\text{to}}}$
- Deformation bei $\frac{A_{\text{tatsächlich}}}{A_{\text{ref}}}$
- A_{ref} ist die minimum Referenzform

Top view, circle as reference shape



Sidelong view, rectangle as reference shape



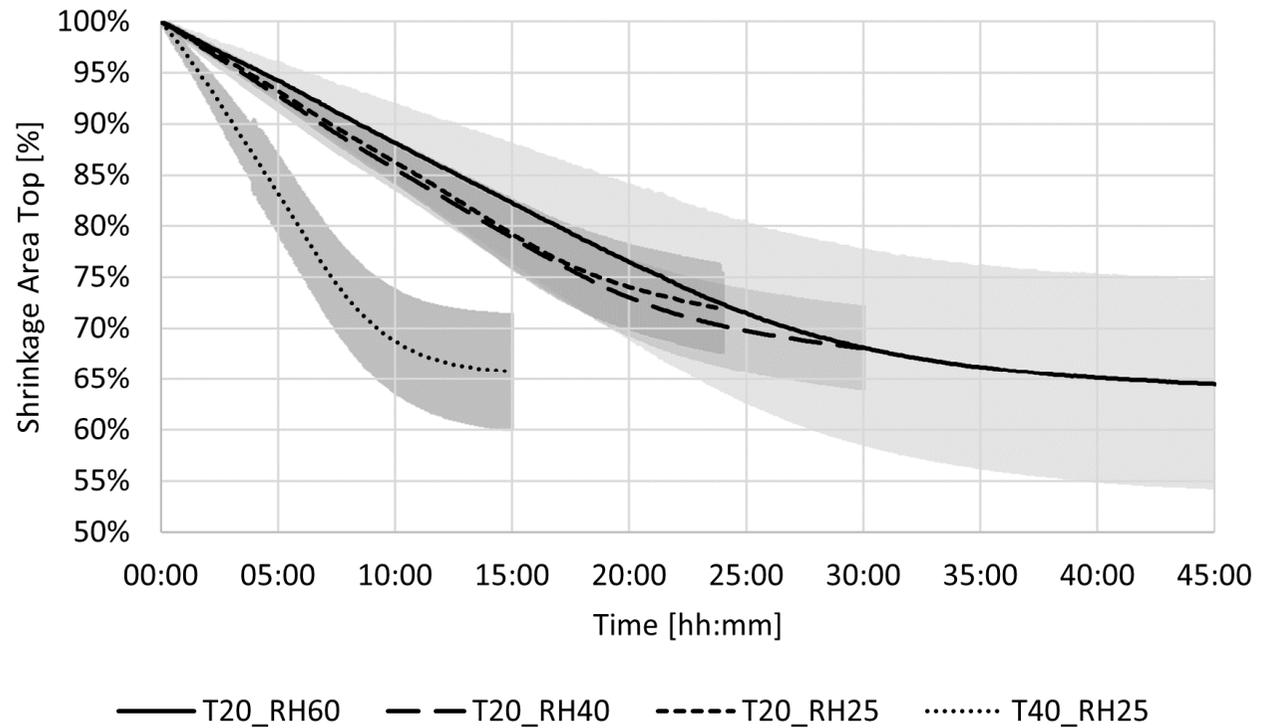
[Demo Video Seitsicht \(30sec\)](#)

[Demo Video Aufsicht \(30sec\)](#)

Ergebnisse Optische Parameter

Schrumpfung Aufsicht

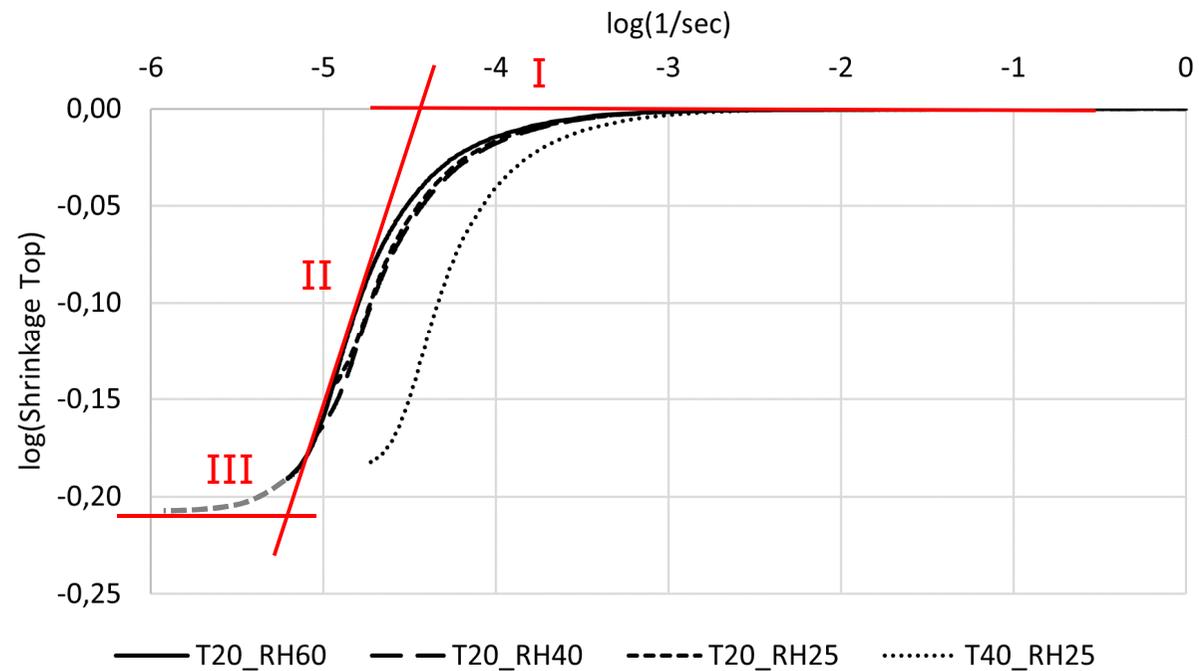
- Ähnliche Schrumpfung bei 20°C und RH25%, RH40%
- Schrumpfung bei 40°C viel schneller
- Ähnliche Größenordnung der Schru



Ergebnisse Optische Parameter

Schrumpfung Aufsicht

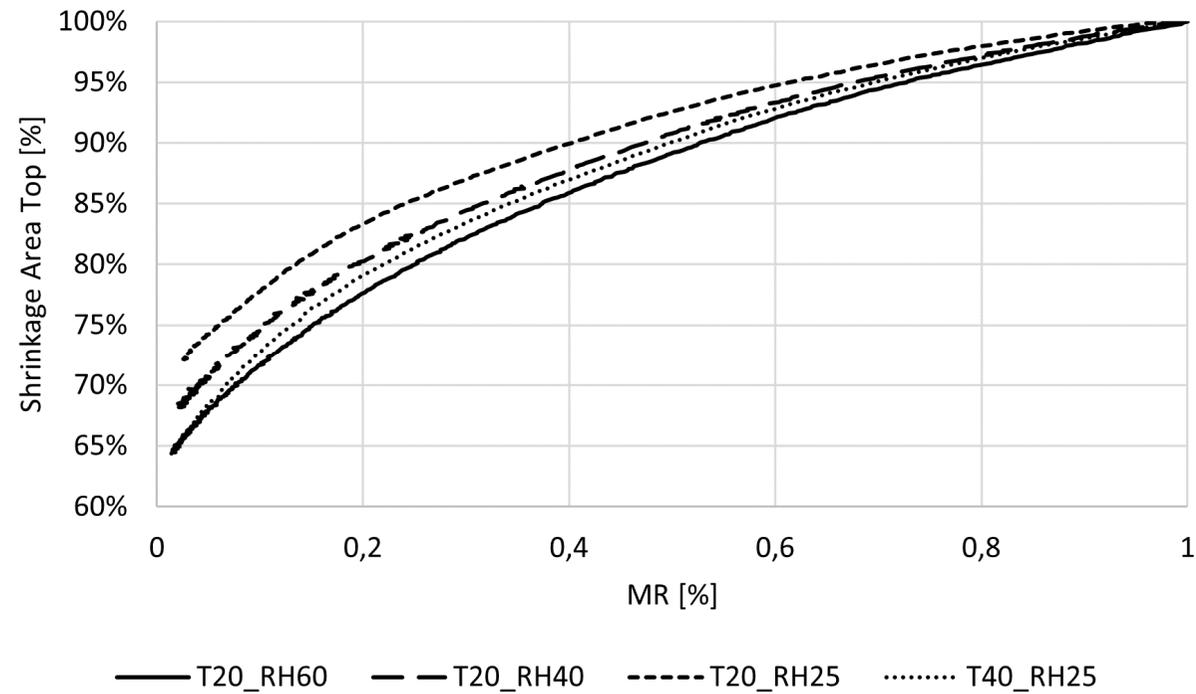
- Unterschiedliche Schrumpfstadien
- Ca. 90% der Trocknungszeit ist Status II



Ergebnisse Optische Parameter

Schrumpfung Aufsicht

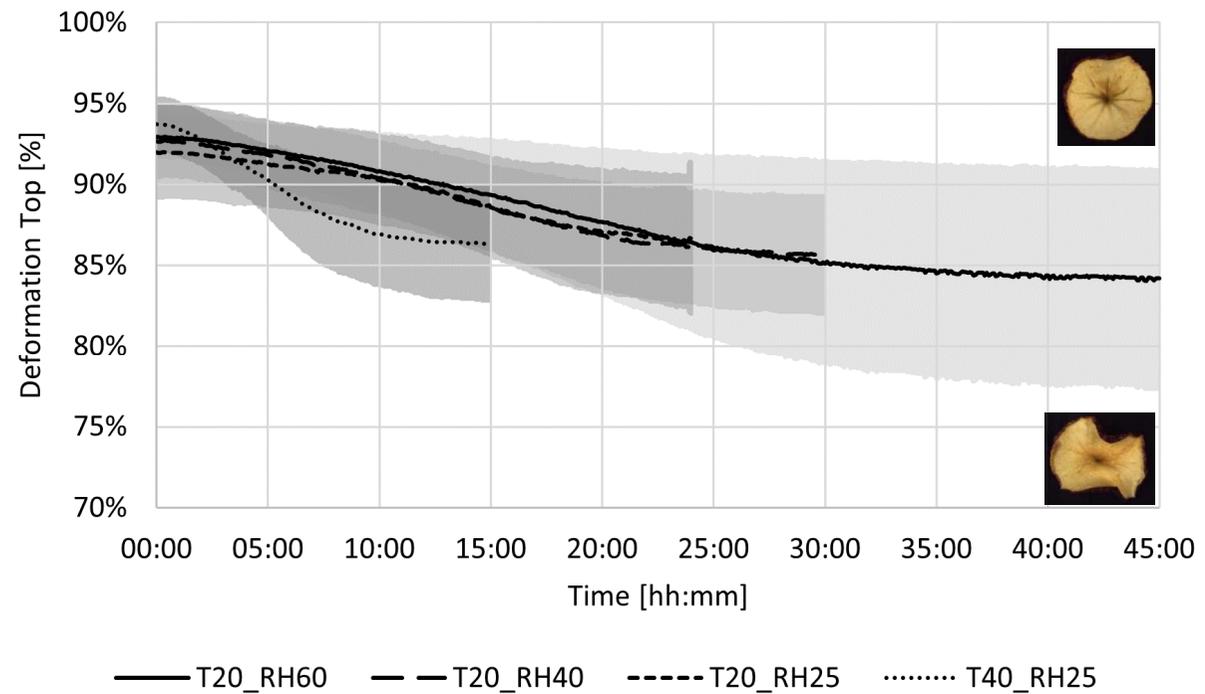
- Keine lineare Schrumpfung mit MR
- Schrumpfung steigt mit weniger MR



Ergebnisse Optische Parameter

Deformation Aufsicht

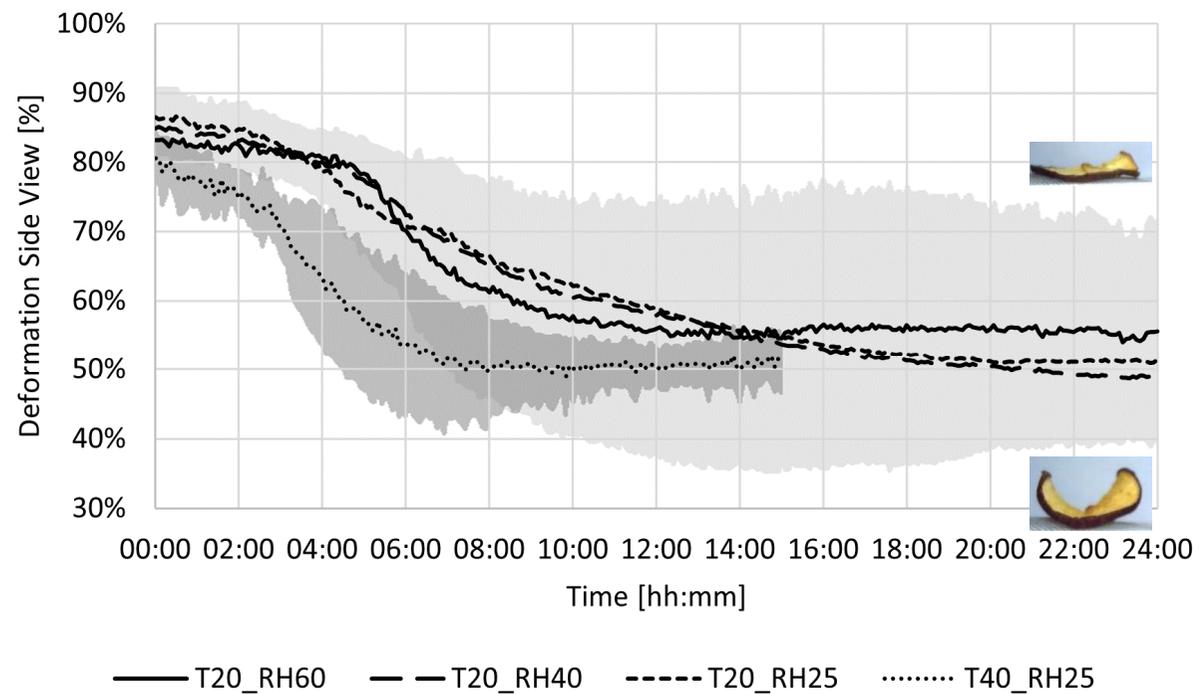
- Ähnliche Deformation bei 20°C
- Starke Schwankung der Deformation



Ergebnisse Optische Parameter

Deformation Seitsicht

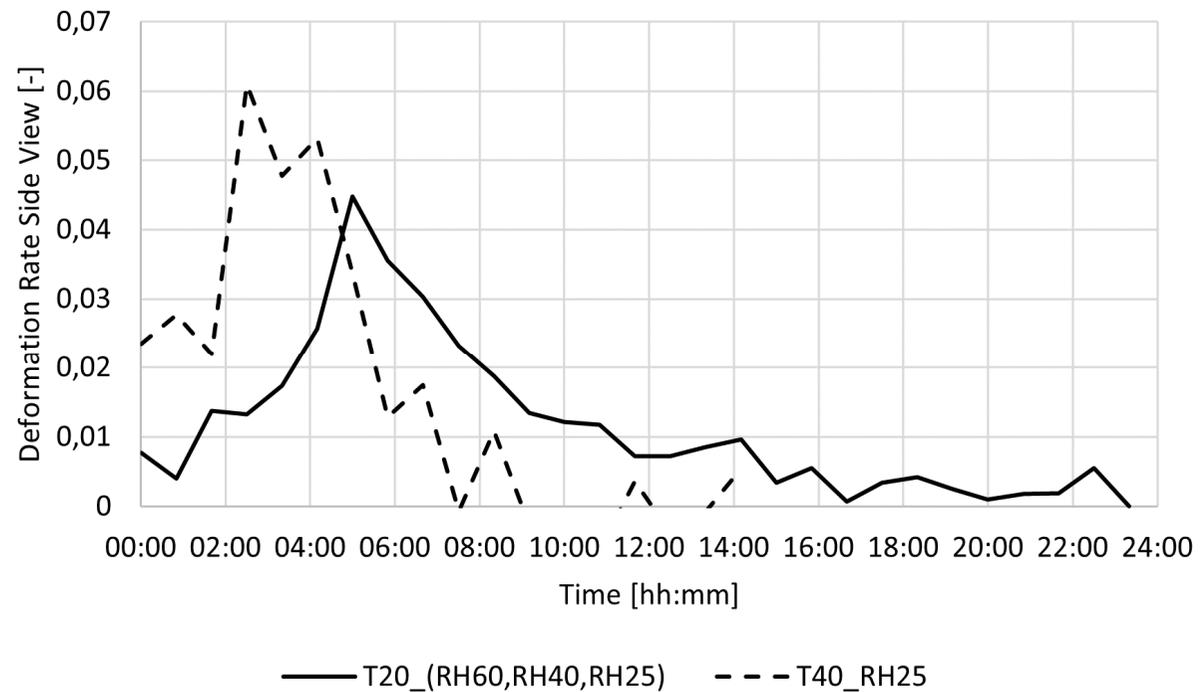
- Similar deformation at 20°C
- Starke Schwankung der Deformation



Ergebnisse Optische Parameter

Deformation Seitsicht

- Höchste Deformation bei 40°C nach ca. 4h
- Höchste Deformation bei 20°C nach ca. 6h

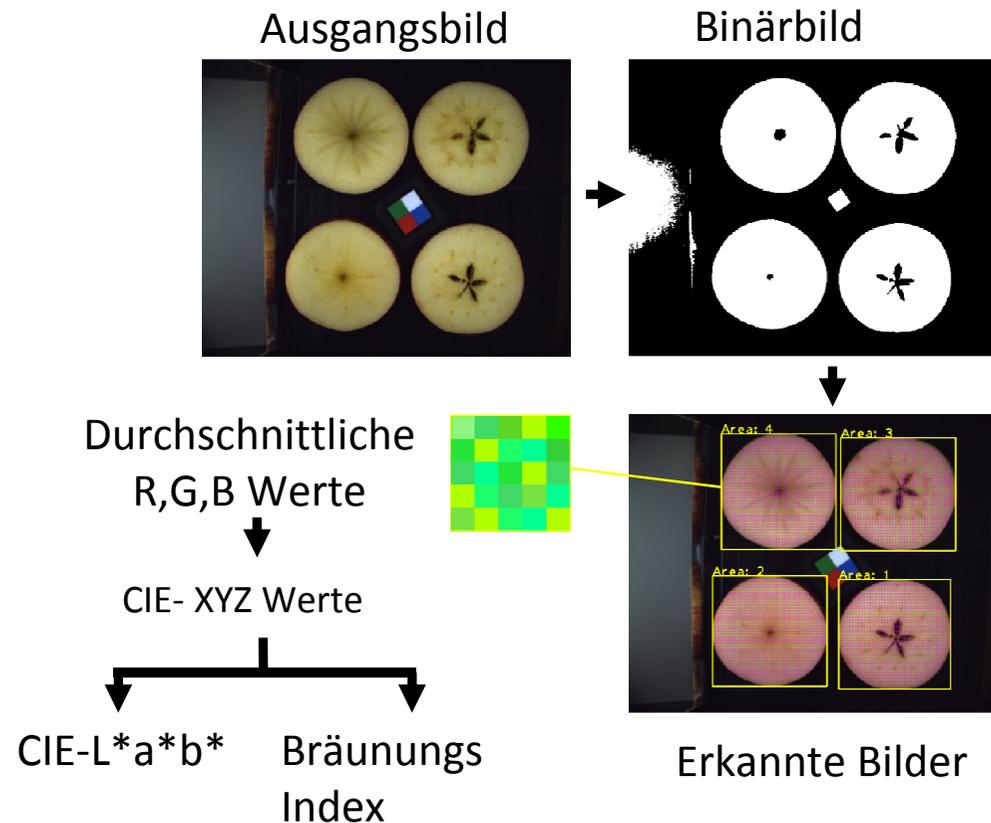


[Demo Video Deformation Seitsicht \(30sec\)](#)

Optische Parameter (Farbänderung)

Messprinzipien

- Analysiert mit Java Tool und Open CV
- Auslesen und Durchschnitt der RGB-Werte für jeden Apfelschnitt und jedes Bild
- Umrechnung in CIE-L * a * b * -Farbraum und Browning-Index ^[3]

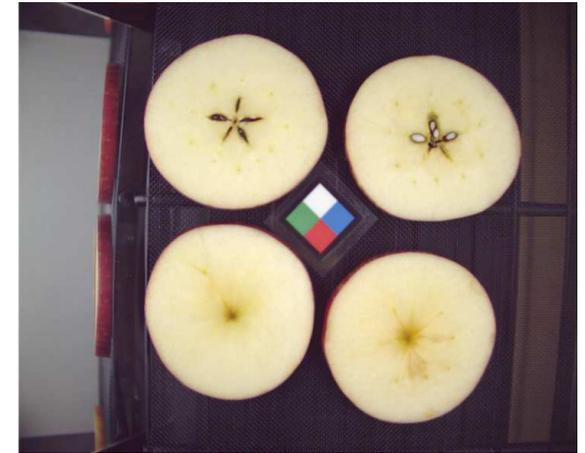
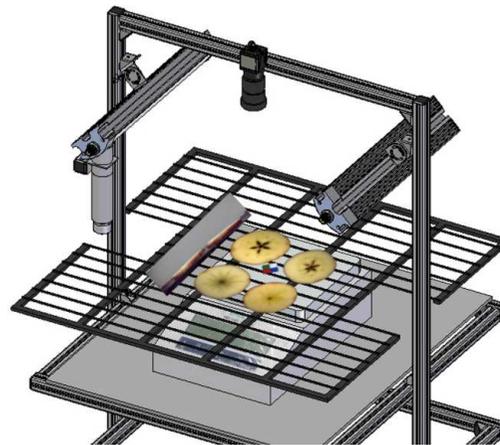


[Demo Video \(30sec\)](#)

Optische Parameter (Farbänderung)

Kalibrierung

- Kalibrierung mit Standardfliese
- Fremdlicht
- Weißabgleich
- Schwarzwert der Kamera
- Datei Format
- Dunkles Bild



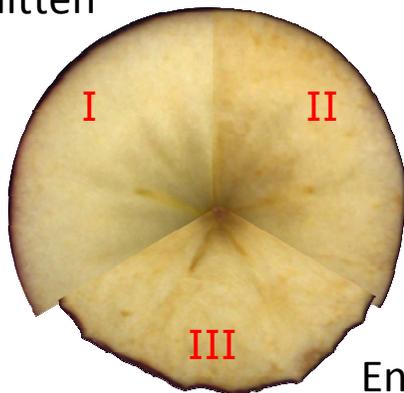
Standardabweichung von ca. 1300 Bildern von nur 3Bit → 1,1%

Optische Parameter (Farbänderung)

Farbe CIE-L Wert

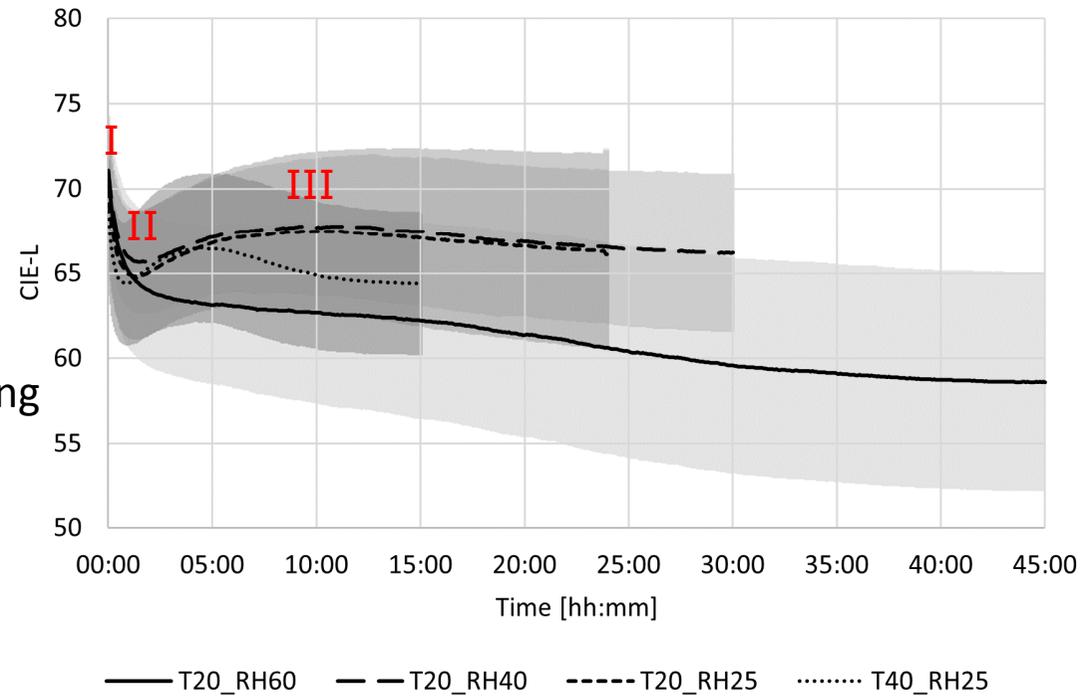
- T20_RH40 und T20_RH25 ähnlich
- Minimum nach ca. 3-4h

Frisch geschnitten



Enzymatische Bräunung
+ feuchte Mitte
(dunkel)

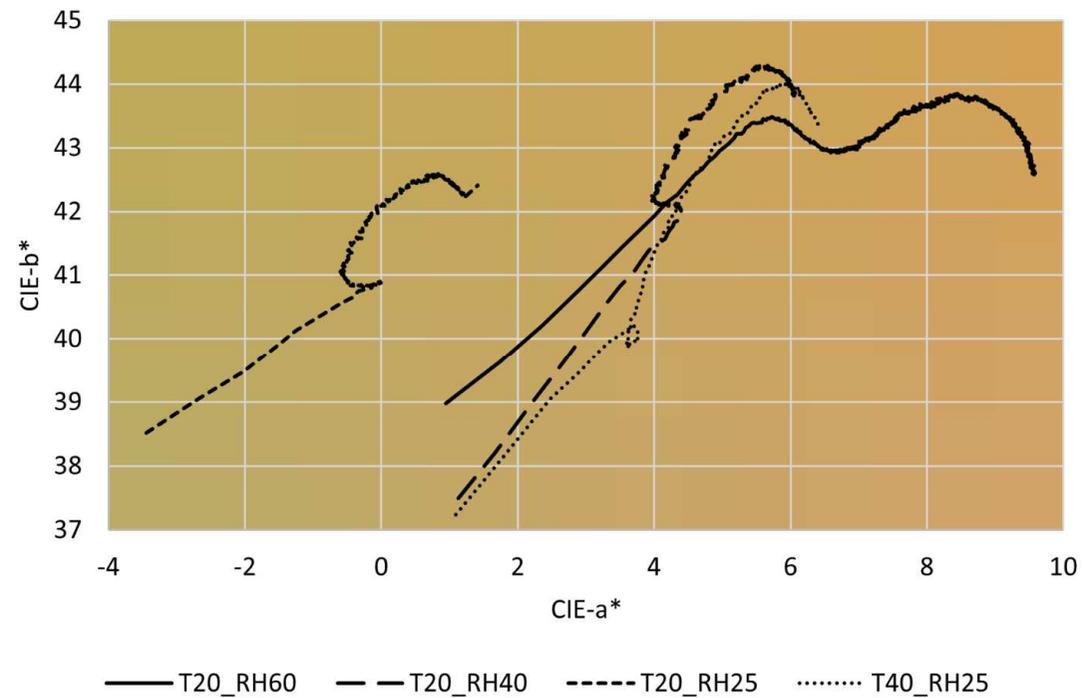
Enzymatische Bräunung
+ trockene Mitte (hell)



Ergebnisse Optische Parameter

Farbe CIE-a und CIE-b Wert

- Größte Veränderung innerhalb der ersten paar Stunden
- Seltsame "Haken" Form



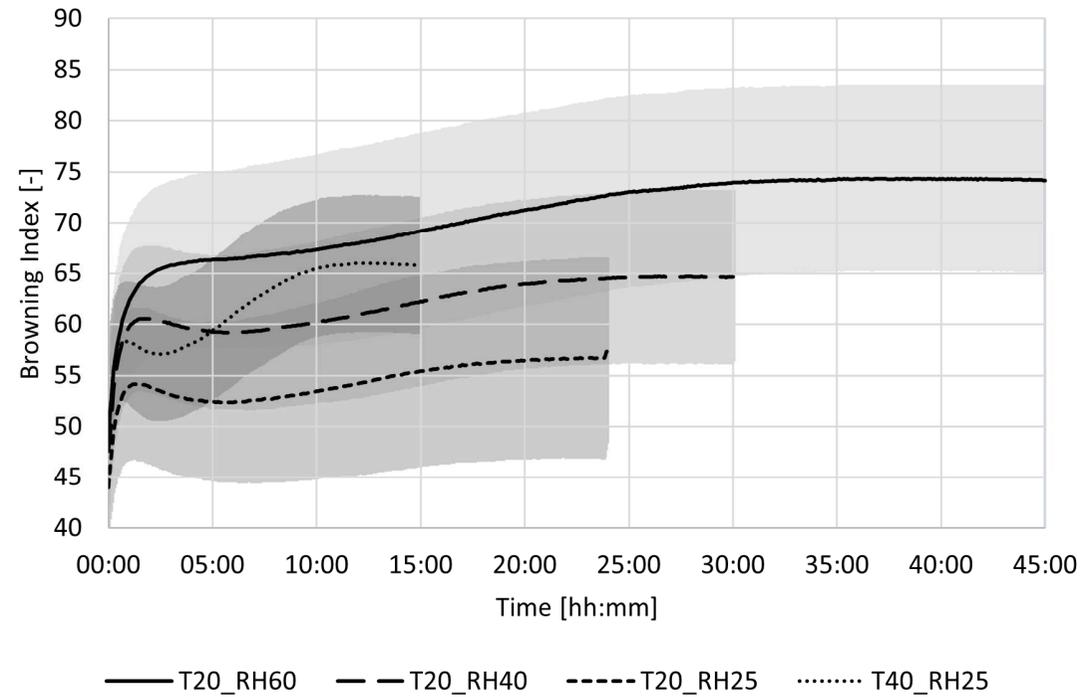
[Demo Video \(30sec\)](#)

Ergebnisse Optische Parameter

Bräunungsindex

- Steigt mit Feuchtigkeit
- Minimale Ergebnisse vom CIE-L-Wert
- Buera et al. [4]

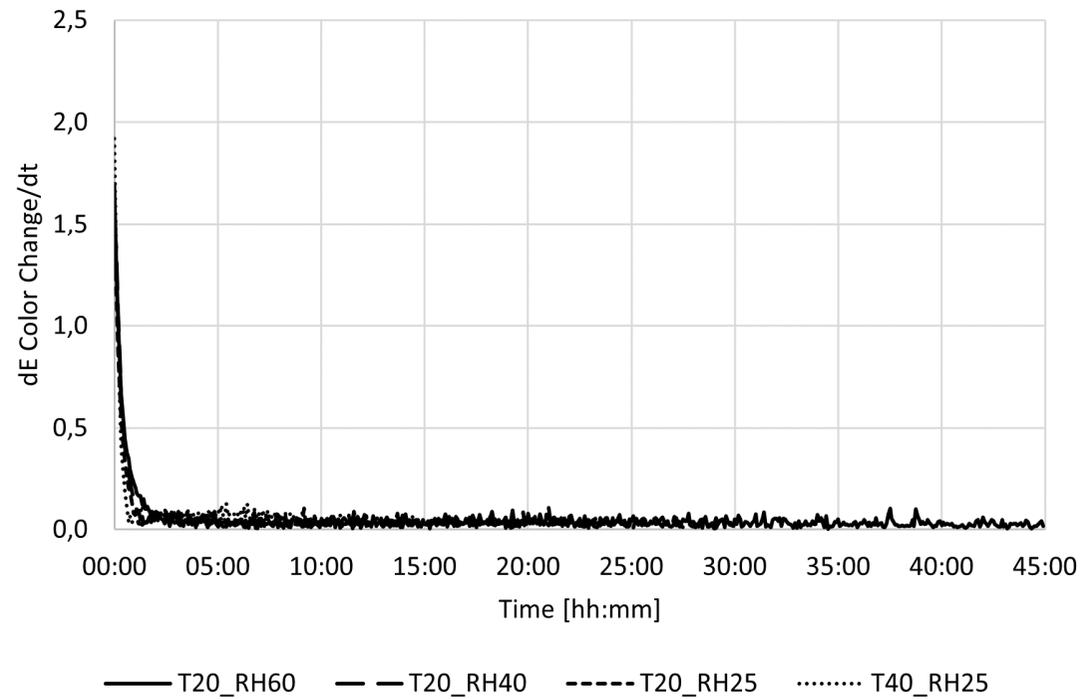
$$BI = \frac{(x_{D65} - 0,32)}{0,162} * 100$$



Ergebnisse Optische Parameter

Farbänderungsrate

- Alle Farbwechsel erfolgten innerhalb der ersten 2-3 Stunden
- Der Trocknungsprozess hatte keinen Einfluss auf den Farbwechsel



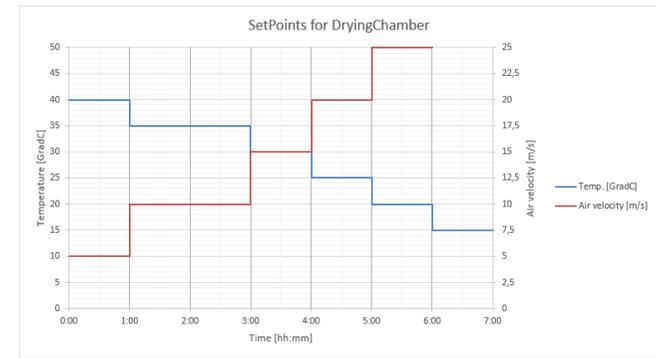
Dynamische Trocknung

SetPointMaker

use . (1.5) instead of , (1,5) as delimiter

duration [min]	Temp. [GradC]	Air velocity [Hz]	HeatPump [GradC]
60	40	5	5
120	35	10	5
60	30	15	5
60	25	20	5
60	20	25	5
60	15	30	5

update Graph
generate SetPoints



Duration: 7 std. 0 min.



Fazit

- Die Formerkennung funktioniert sehr präzise und zuverlässig (nicht nur Äpfel)
- Farbmessung erfordert eine sehr gute Bildqualität (Beleuchtungsbedingungen, Kameraeinstellungen, Schwarzwert, Weißabgleich, Farbräume, Dateiformat usw.)
- Optische Analyse direkt in LabVIEW → reagiert sofort auf optische Änderungen
- Intelligente Trocknungsprogramme mit Fokus auf Produktqualität und/oder Energieaspekte
- AI könnte verwendet werden, um Trocknungszustände zu erkennen (z. B. wenn die Diffusion der Haupttransportprozess ist, dann die Temperatur verringern)



Gliederung 10: Verbesserte Trocknungsstrategien – Konzept für Enthalpie-kontrollierte Trocknung

Christian Kopp, Michael Bantle

Zugehörigkeit: SINTEF Energi AS + Thermal energy

Trondheim (Norway)

Christian.Kopp@Sintef.no

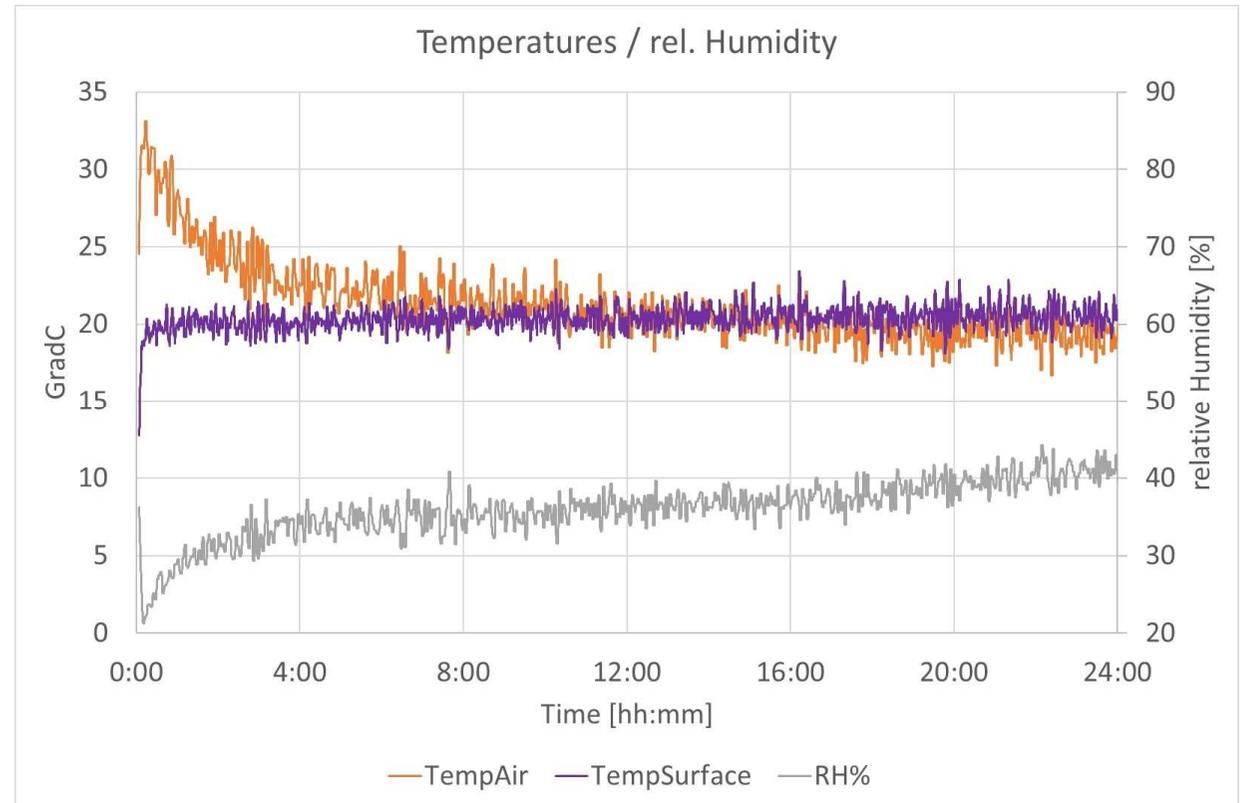
michael.Bantle@Sintef.no



Erste Ergebnisse

Vorschriften

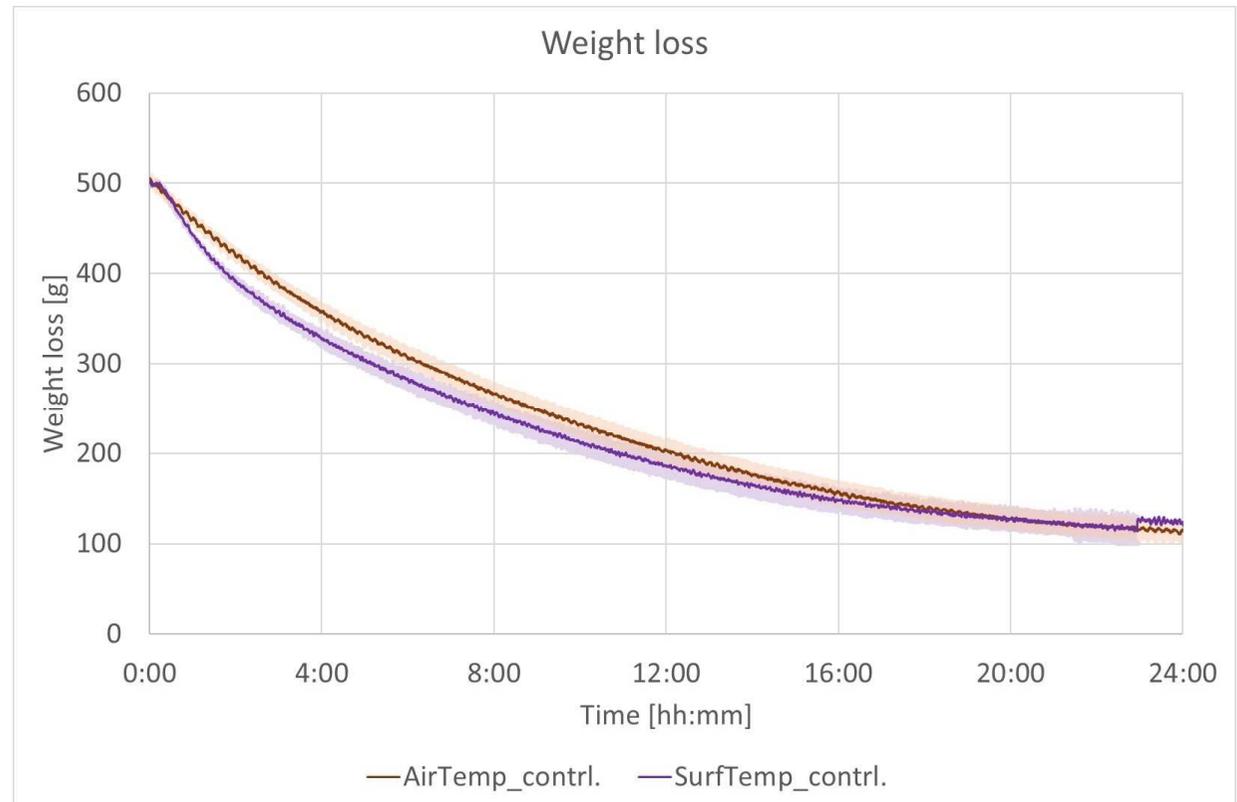
- Konstante Oberflächentemp. (und nicht konstante Trocknungstemperatur)
- Noch keine Feuchtigkeitsregulierung
- Schwankungen aufgrund von Sensorunsicherheiten



Erste Ergebnisse

Gewichtsverlust

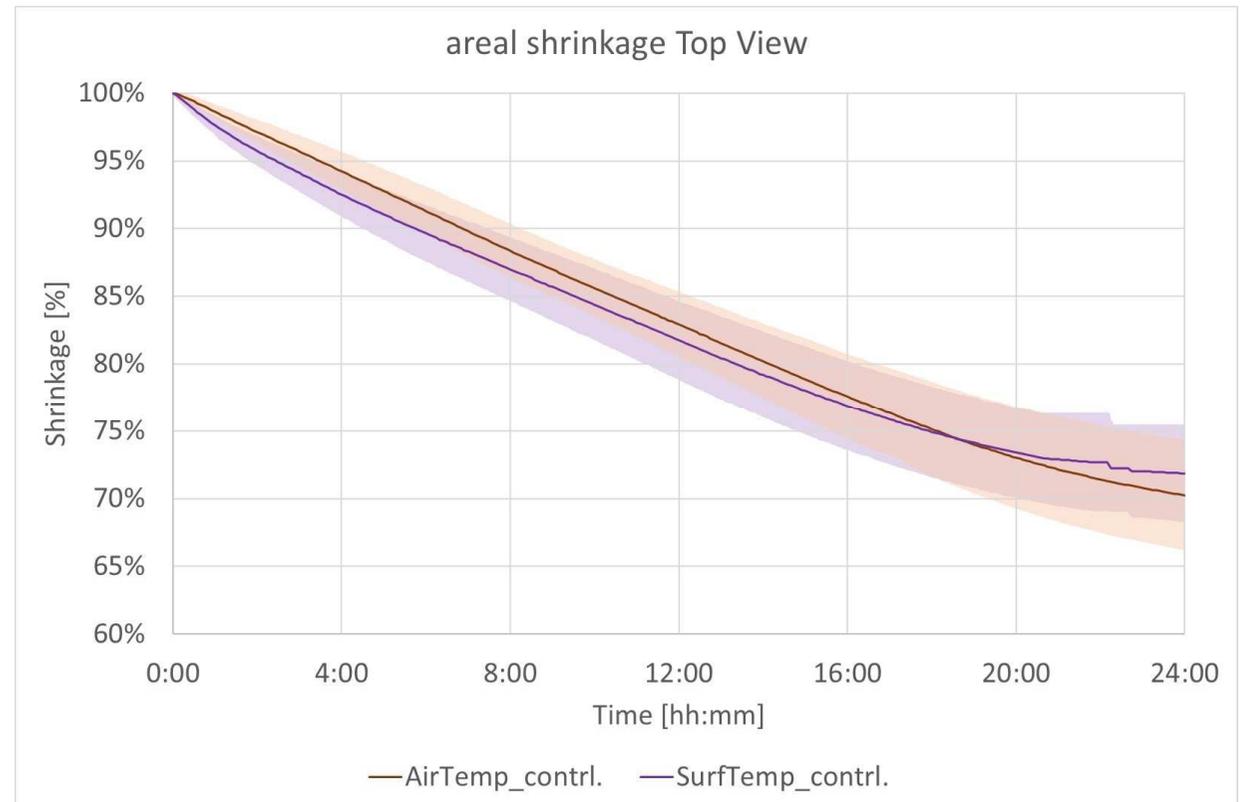
- Schnelleres Trocknen am Anfang wegen höherer Temperatur



Erste Ergebnisse

Schrumpfung Aufsicht

- Ergebnisse: Durchschnittlich 8 Apfelscheiben
- Ähnlicher Schrumpfungsfortschritt



Erste Ergebnisse

Bräunungsindex

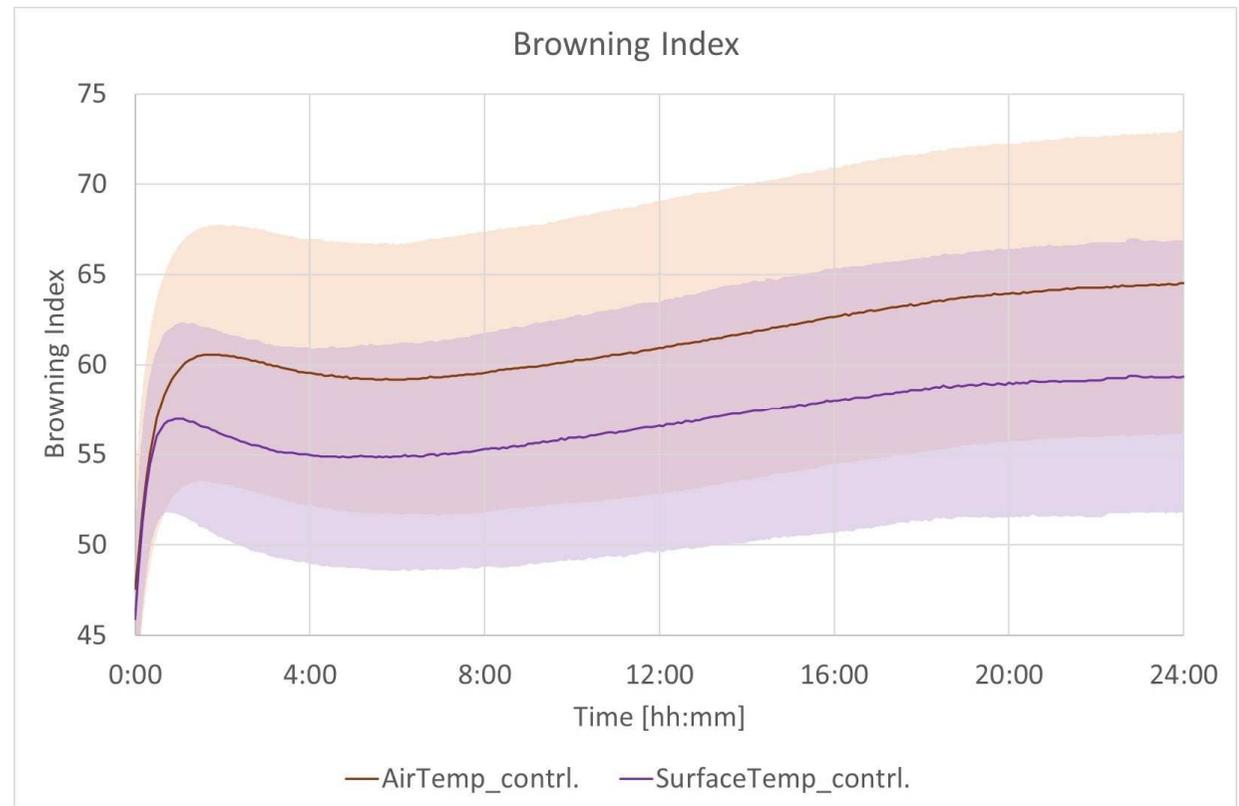
- Durchschnittlich 8 Apfelscheiben
- RGB \rightarrow XYZ \rightarrow $x = X / (X + Y + Z)$

$$BI = \frac{(x_{D65} - 0,32)}{0,162} * 100$$

BI=60



BI=55





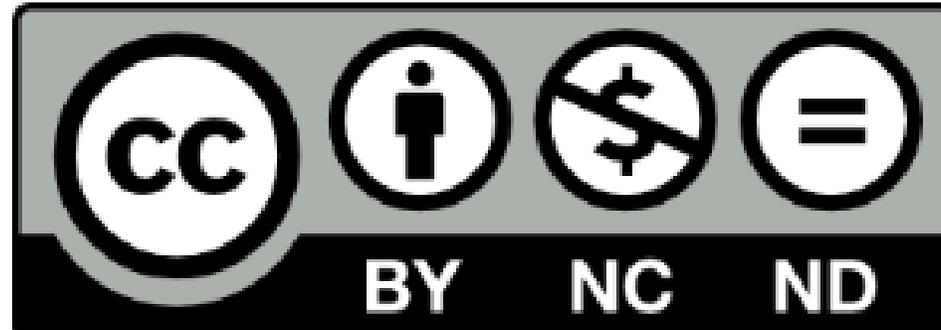
Fazit

- Verbesserungen der Vorschriften und Kontrollstrategie des Trocknungssystems
- Beschleunigung des Trocknungsprozesses
- Kein Produktschaden durch Überschreiten der Oberflächentemperatur
- Positiver Einfluss auf Vitamin C und Farbwechsel [Chou und Chua 2003]
- Nützlich für empfindliche Trocknungsprodukte



Verweise

1. **BEIGI, M., Energy efficiency and moisture diffusivity of apple slices during convective drying. Food Science and Technology, 2016. 36: p. 145-150.**
2. **Bradski, G., The OpenCV Library, Dr. Dobb's Journal of Software Tools, 2000. Opencv.org**
3. **al., B.e., Definition of colour in the non enzymatic browning process. Die farbe, 1986. 32: p. 318-322.**
4. **Hirschler, R., Whiteness, Yellowness and Browning in Food Colorimetry, in Color in Food: Technological and Psychophysical Aspects, M.d.P. Buera, Editor. 2016.**



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.