

Möglichkeiten zur Überwachung der Produktqualität und Anpassung der Trocknungsbedingungen

Christian Kopp, Michael Bantle

Zugehörigkeit: SINTEF Energi AS + Thermal energy

Trondheim (Norway)

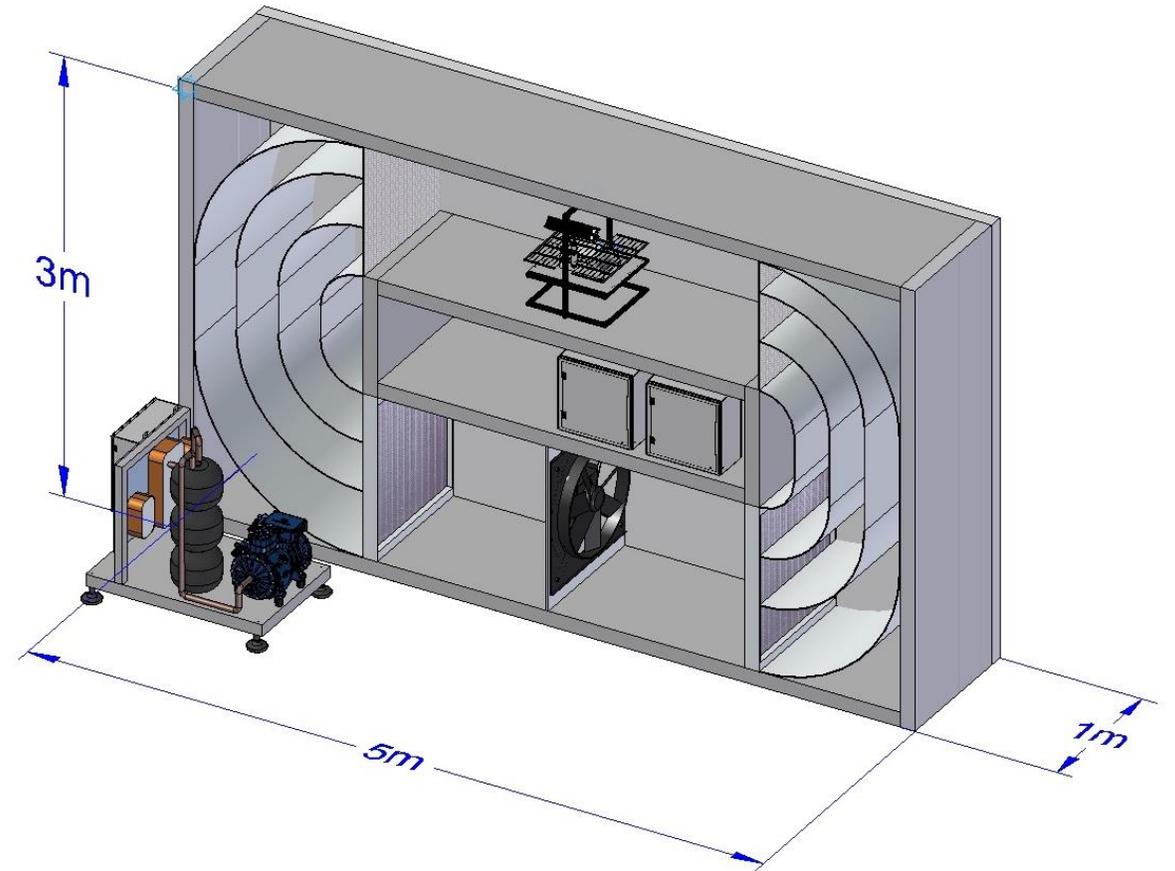
Christian.Kopp@Sintef.no

michael.Bantle@Sintef.no

Ausgangssituation

Mögliche Einstellungen

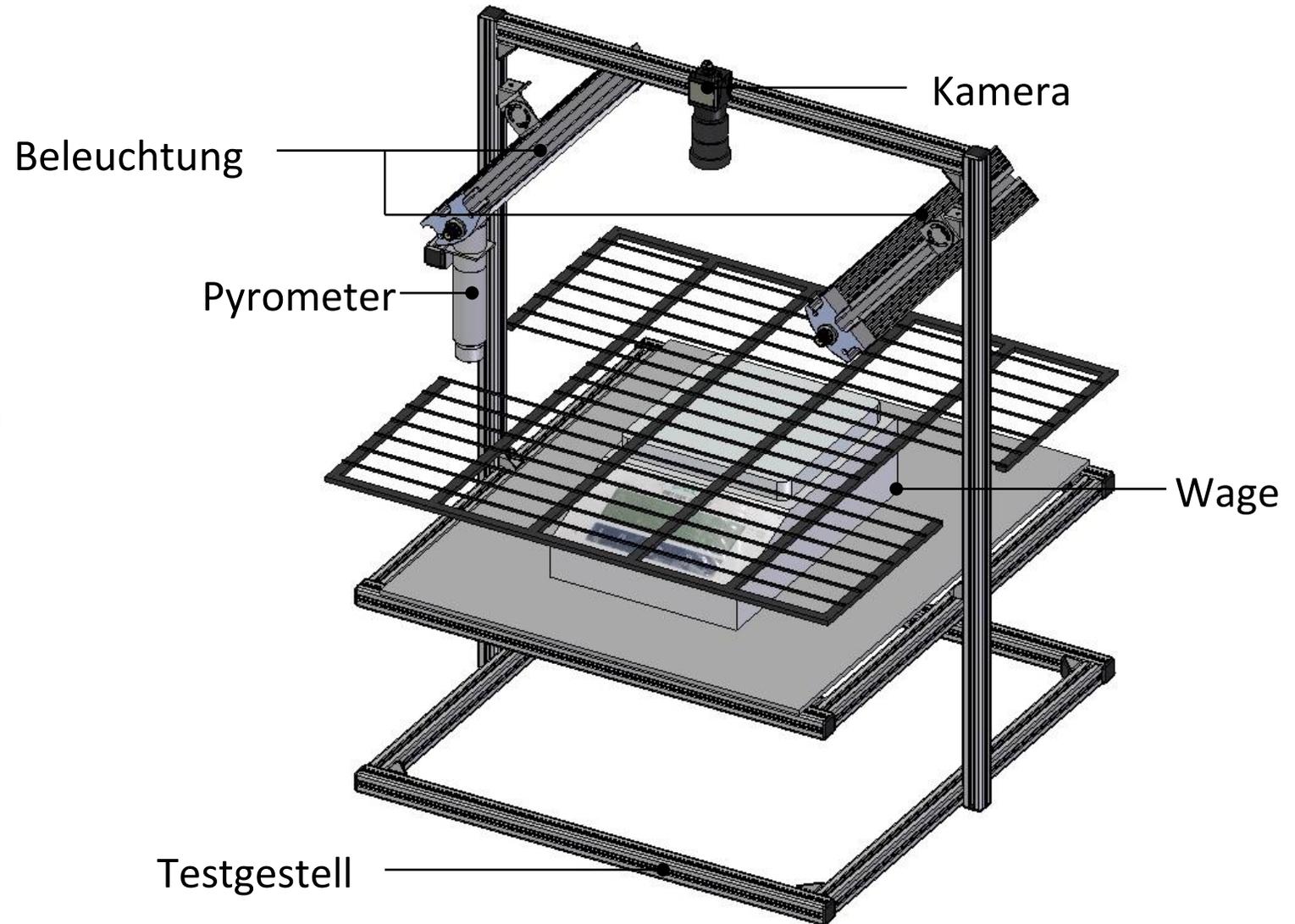
- Temperatur einstellen
- Luftgeschwindigkeit einstellen
- Glykoltemperatur einstellen
- Aufzeichnung der Temperatur
- Aufzeichnung der relativen Luftfeuchtigkeit
- Aufzeichnung der Luftgeschwindigkeit



Änderungen

Neue Sensoren

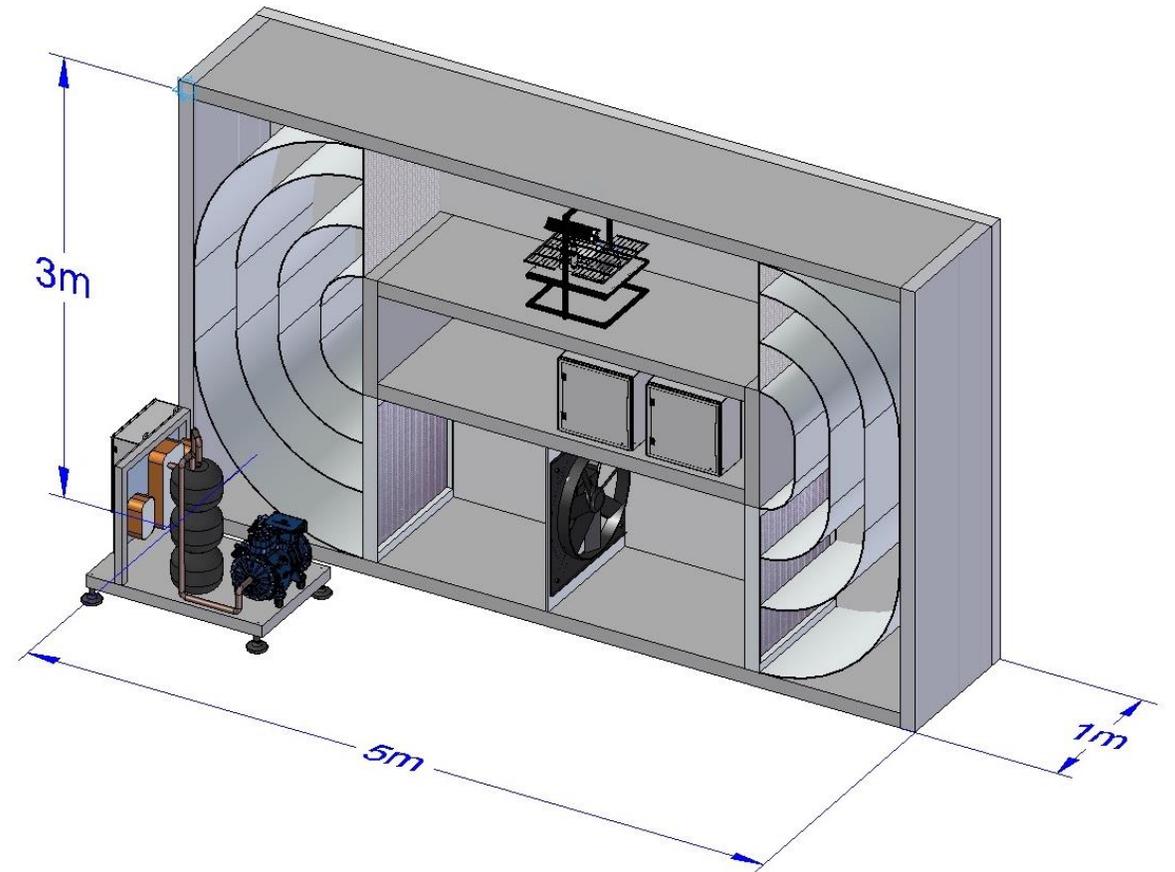
- Wage (Trocknungskinetik)
- Pyrometer (Oberflächentemperatur)
- Kamerasystem mit Beleuchtung (Farbwechsel, Schrumpfung und Verformung)



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)

Overview Options Errors **No Errors** capture data automatic controlling STOP program

Power of Fan [Hz] AirVeloc 1.5 m/s
 0 10 20 30 40 50
 20 Hz

T_Reference_set T_Reference 20.0 °C 19.6 °C
T_Heatpump_set T_heat/pump 5.0 °C 7.4 °C
 Heating 21.1 °C
 HeatpumpSET 15.9 °C
 5

RH%_Inlet 50 %
T_Inlet 20.9 °C
RH%_Outlet 54 %
T_Outlet 20.0 °C

Weight 6 g

chart_AirVelocity
 Air velocity
 velocity m/s
 Time

chart_Temperatures
 GradC
 Time
 T_Cooler-Heater
 T_Reference
 T_Pyrometer
 T_HeatPump

chart_Humidity
 RH %
 GradC
 Time
 RH_Inlet
 T_Inlet
 RH_Outlet
 T_Outlet

chart_Weight
 Scale Gramm
 Gramm
 Time

Camera Preview
 Initiate Camera Start Live Stop Live Exit Capture

Color Temperature 6500
Exposure 0.23017
Pixel Clock 64
Framerate 27
 mode BGRABPacked ShutterMode Rolling
 BlackLevel Off setBlackLevel 128 Gamma 100

ColorInfos
 correctionMode
 EnableHqEnhanced
 colorDepth 32
 ColorMode
 BGRABPacked
 IsOpened
 ConvertMode None

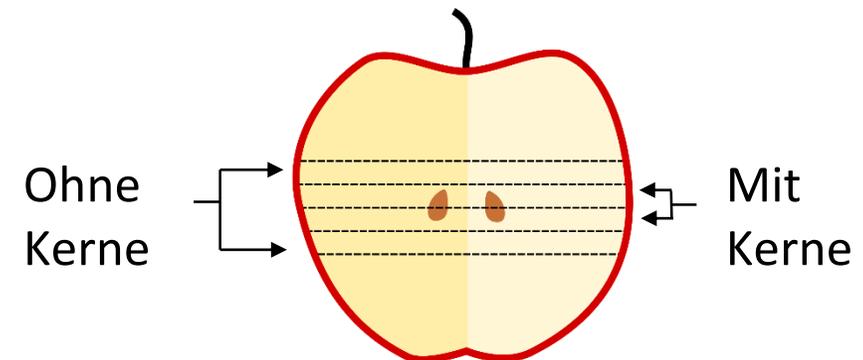
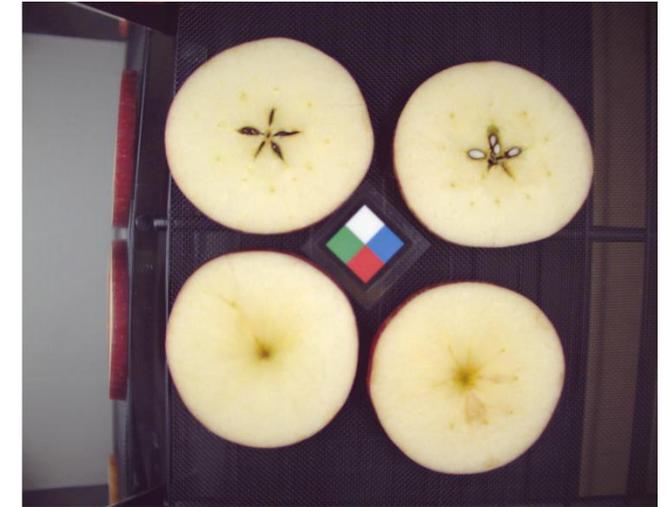
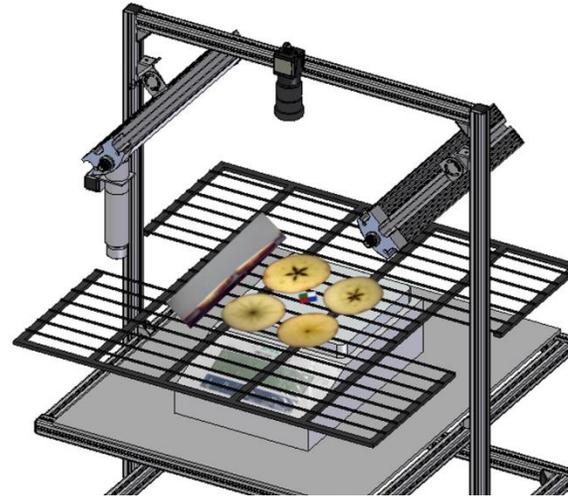
output cluster
 bEnable
 enable
 enable
 enable

Status Temperature Normal Height 1024 Width 1280 modelModeRGB SRGB_D50
 modelModeLSC <0> BitsPerPixel 32 ScalingMode None

Versuchsaufbau

Aufbau

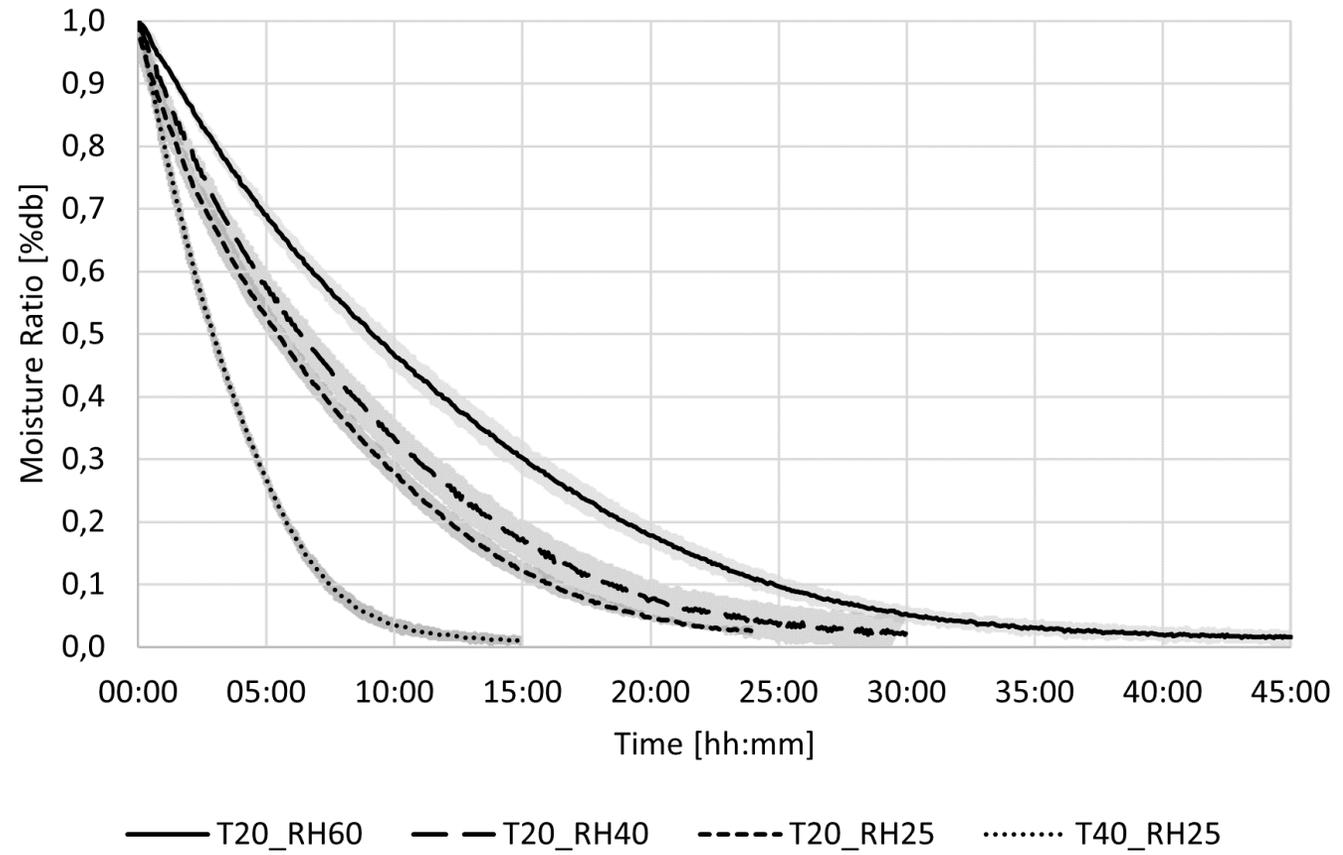
- Apfelscheiben, 5mm Dicke
- Ca. 500g Apfelscheiben auf dem Gitter
- 4 Apfelscheiben unter der Kamera
- Eine unter dem Pyrometer
- Jede Testreihe mindestens 3x



Ergebnisse Trocknungskinetik

Feuchtigkeitsverhältnis

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

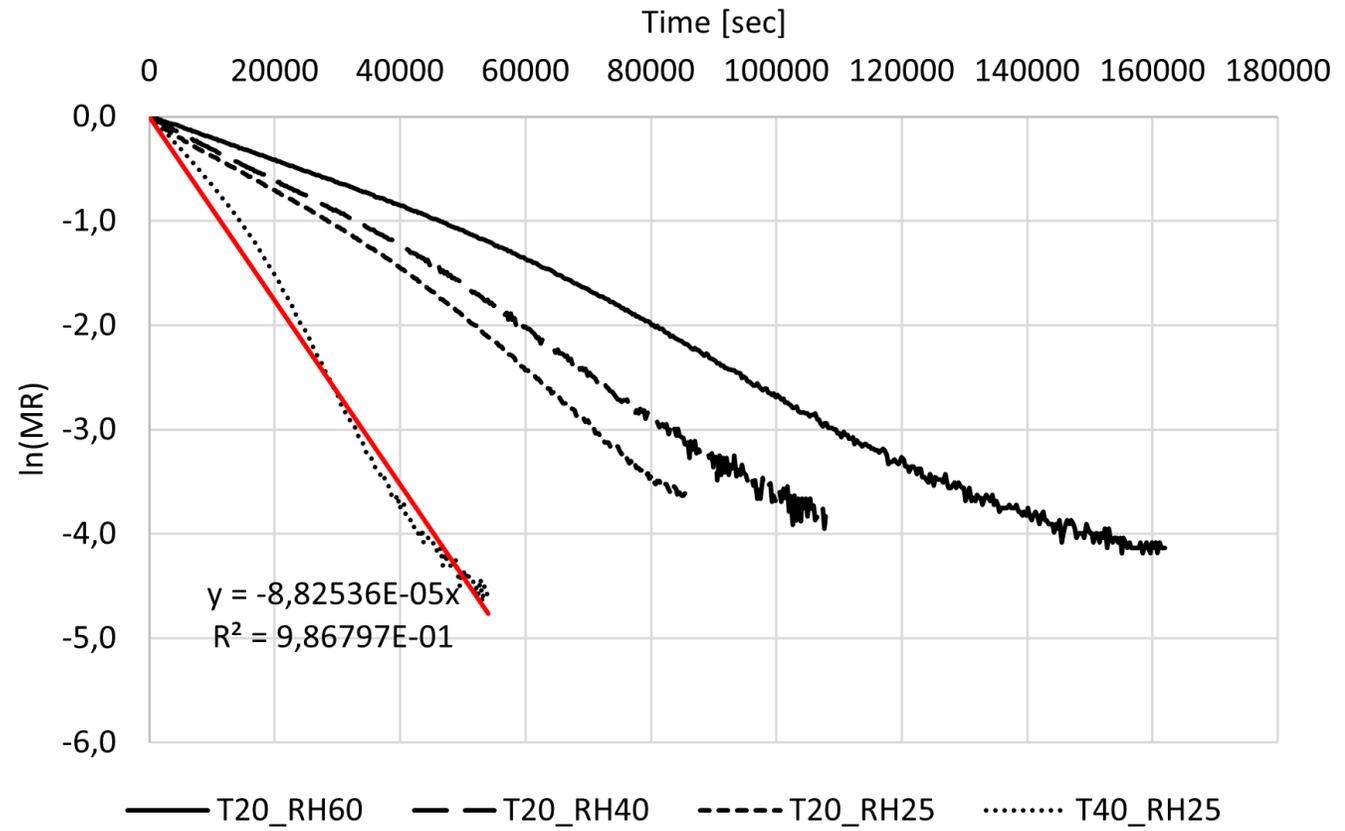


Ergebnisse Trocknungskinetik

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

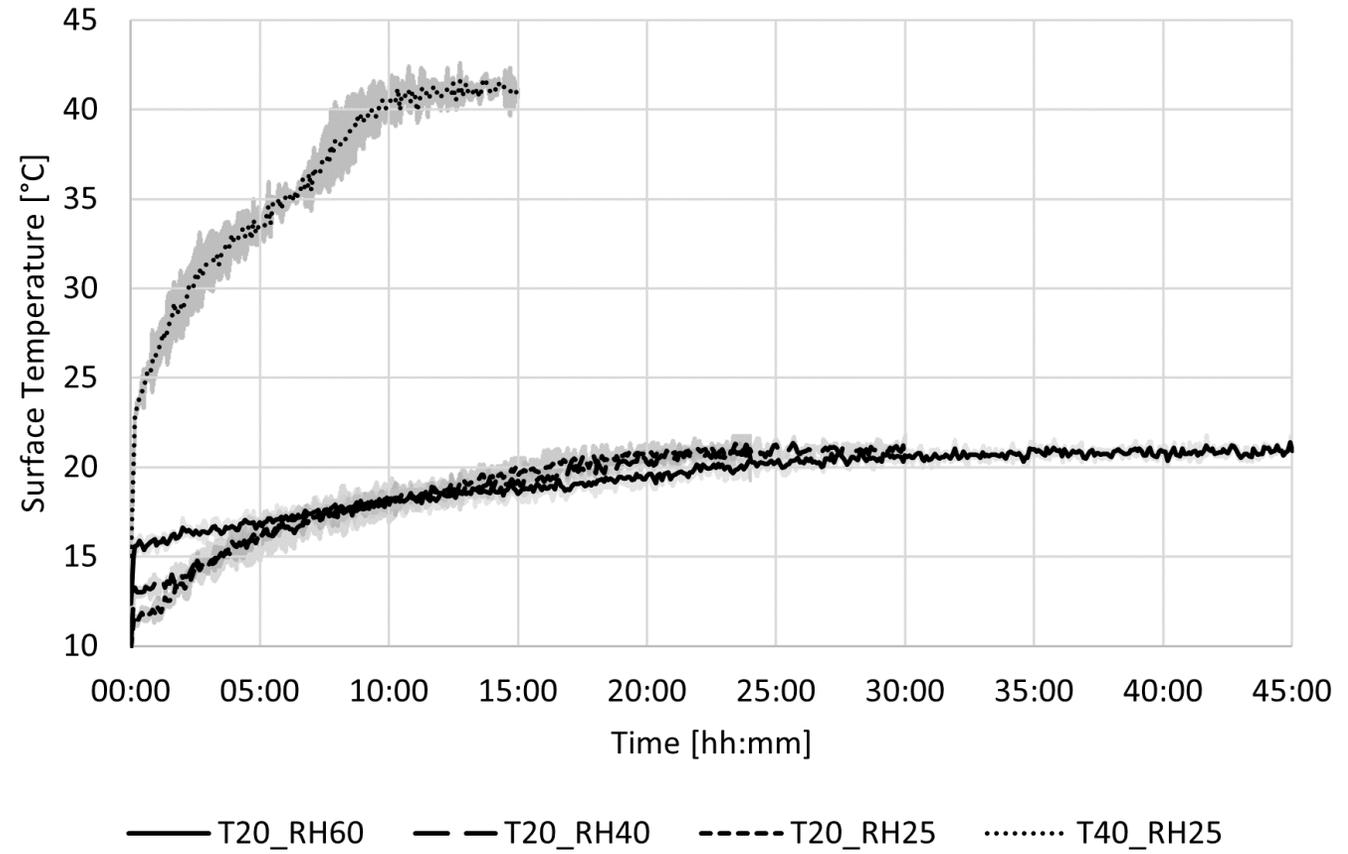
$$D_{eff} = - \left(\frac{4 \left(\frac{Dicke}{2} \right)^2}{\pi^2} \right) * (Steigung\ der\ Linie)$$



Ergebnisse Trocknungskinetik

Oberflächentemperatur

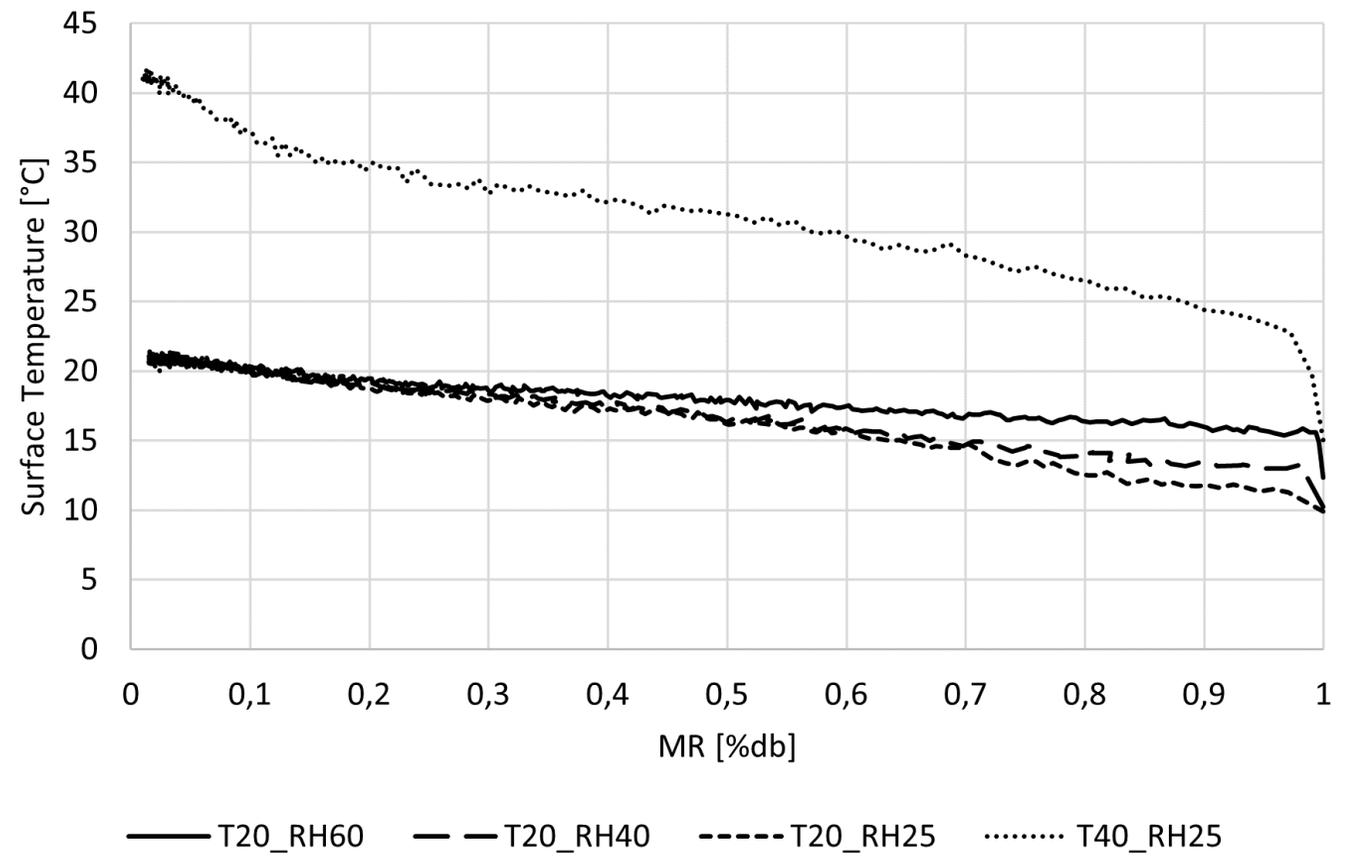
- Eine Apfelscheibe unter dem Pyrometer
- Durchschnitt von mindestens 3 Apfelscheiben



Ergebnisse Trocknungskinetik

Oberflächentemperatur

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

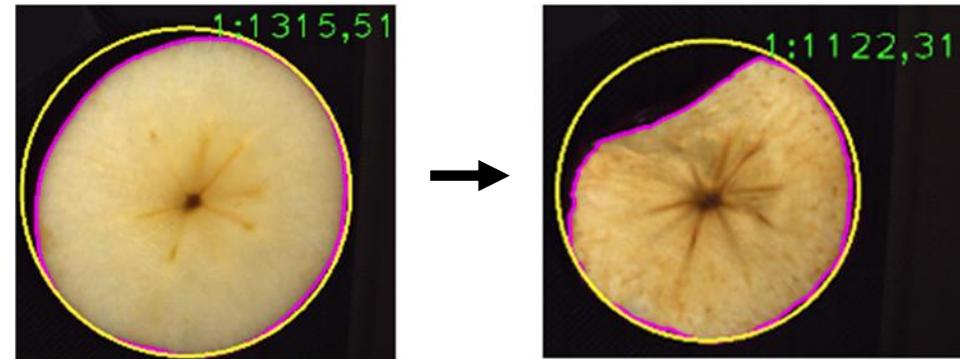


Optische Parameter (Schrumpfung und Verformung)

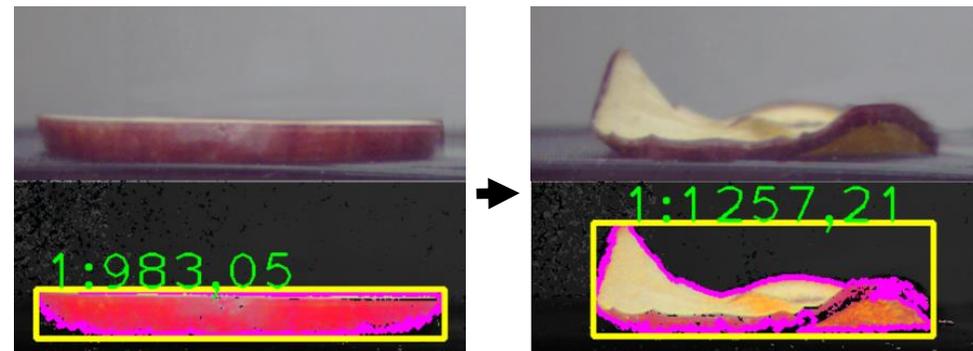
Messprinzipien

- 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



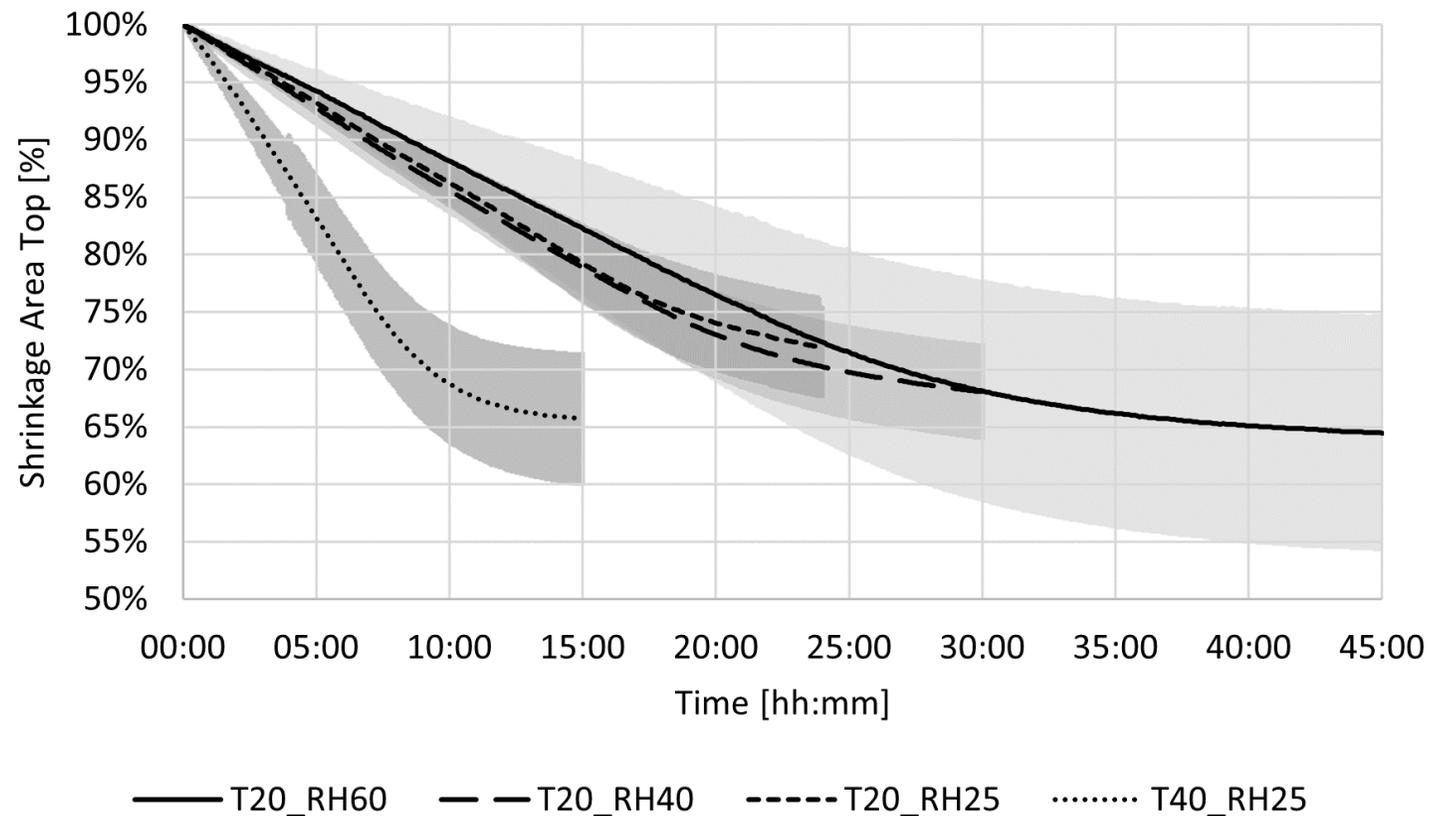
[Demo Video Seitsicht \(30sec\)](#)

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

Ergebnisse Optische Parameter

Schrumpfung Aufsicht

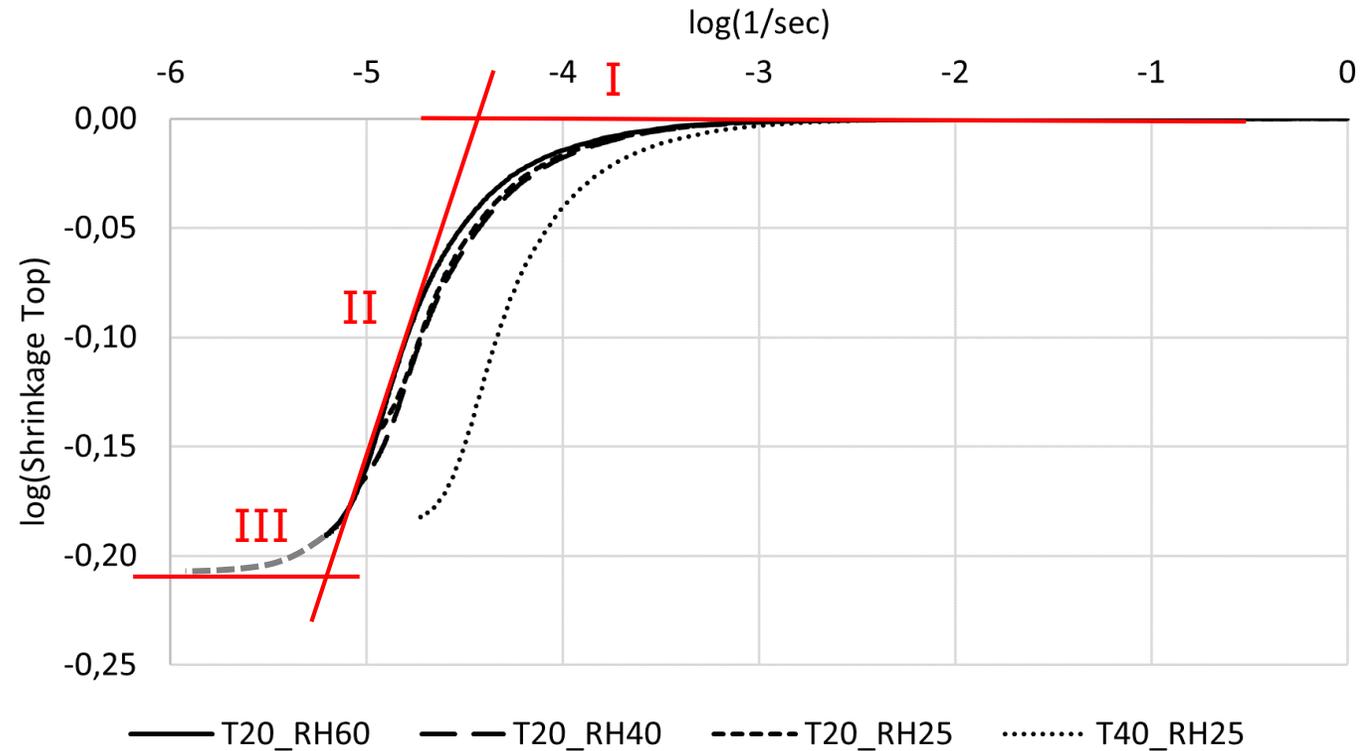
- Ähnliche Schrumpfung bei 20°C und RH25%, RH40%
- Schrumpfung bei 40°C viel schneller
- Ähnliche Größenordnung der Schru



Ergebnisse Optische Parameter

Schrumpfung Aufsicht

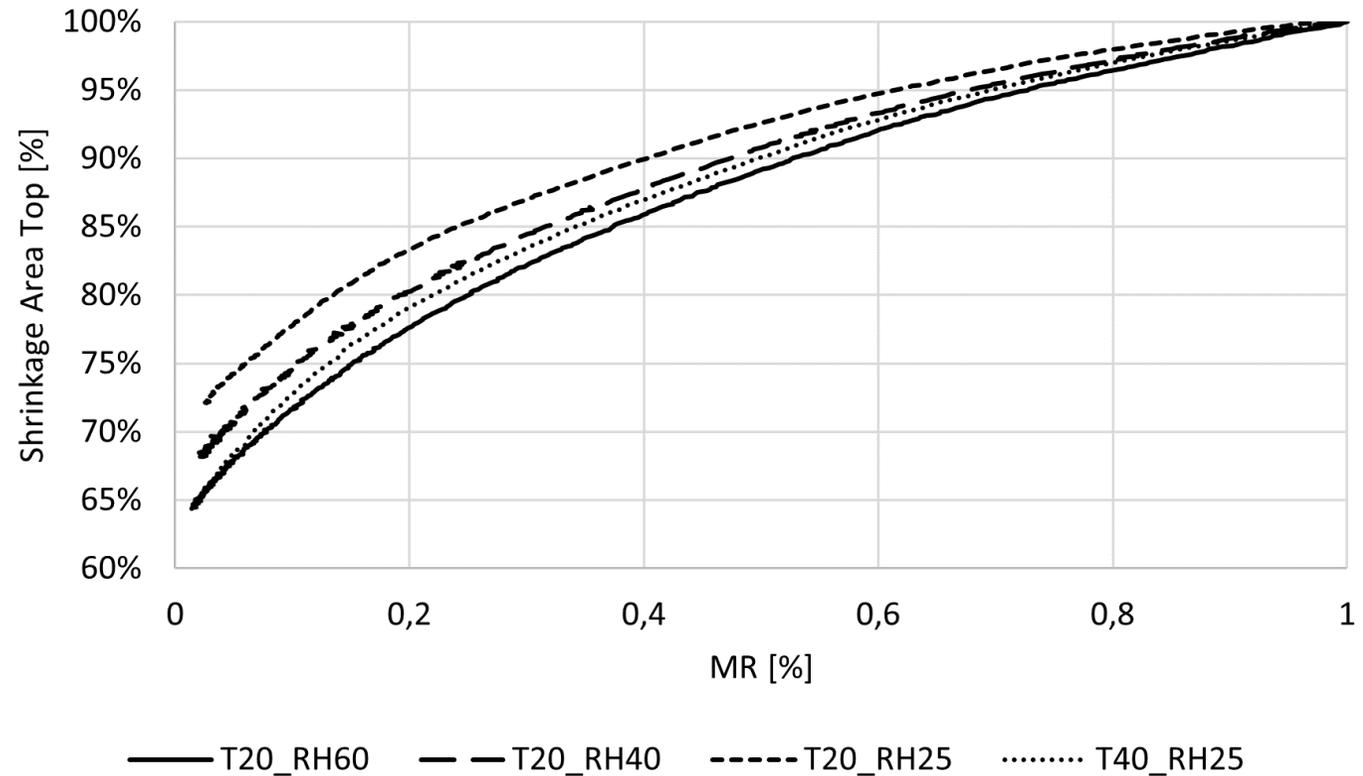
- Unterschiedliche Schrumpfstadien
- Ca. 90% der Trocknungszeit ist Status II



Ergebnisse Optische Parameter

Schrumpfung Aufsicht

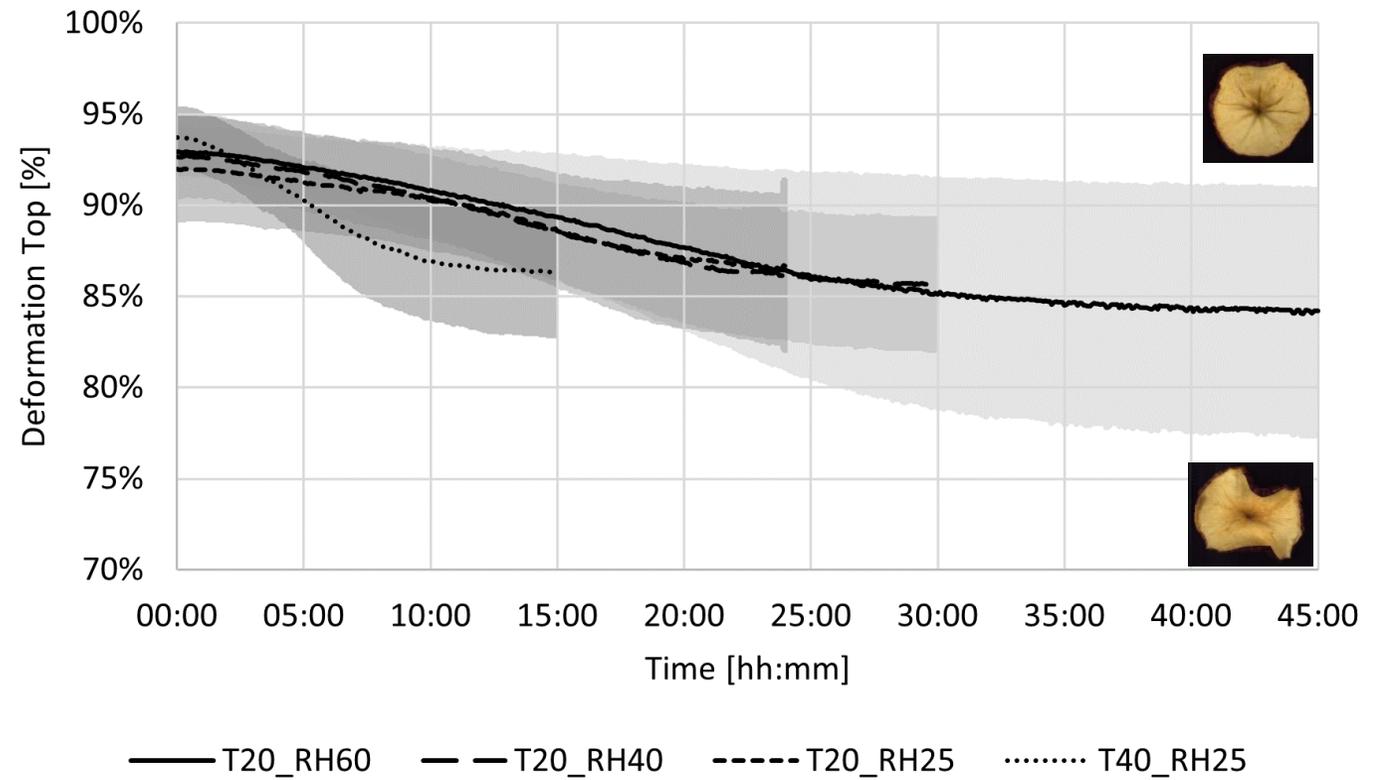
- Keine lineare Schrumpfung mit MR
- Schrumpfung steigt mit weniger MR



Ergebnisse Optische Parameter

Deformation Aufsicht

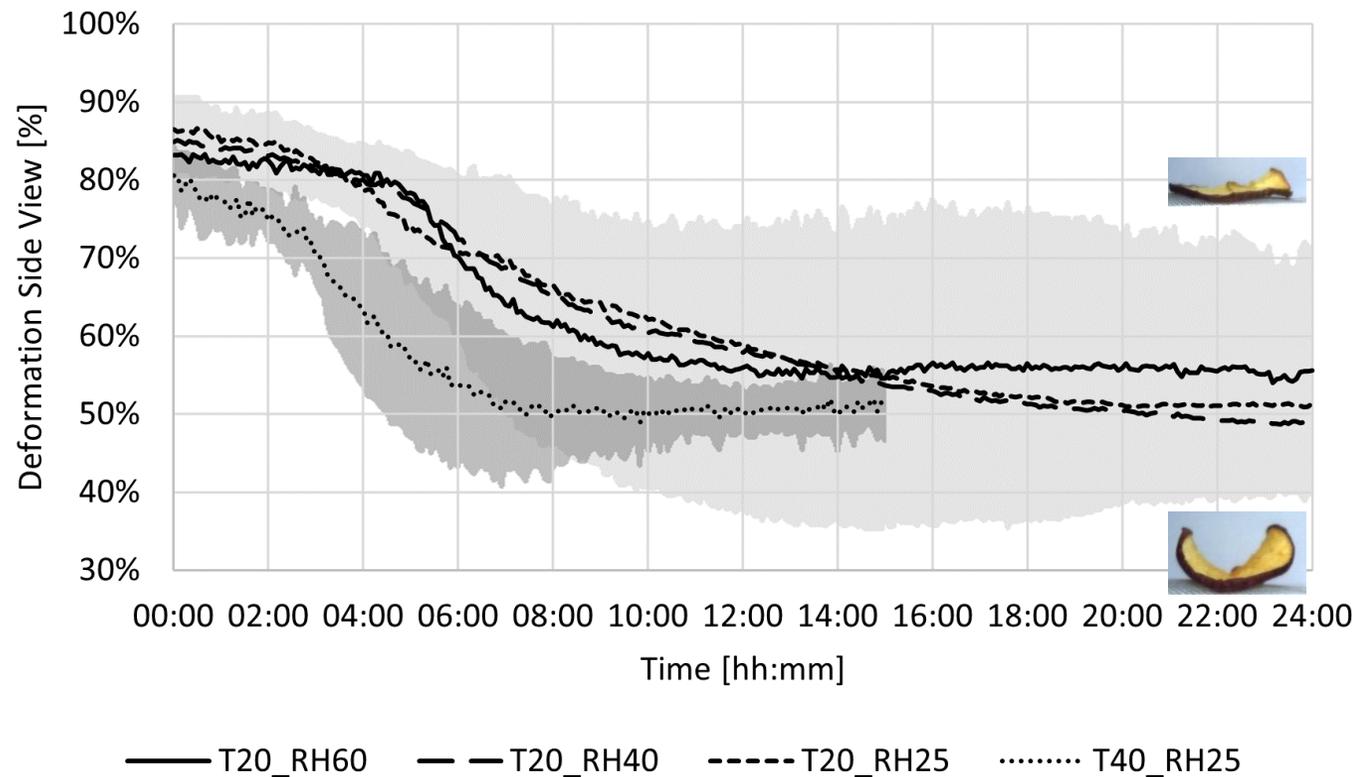
- Ähnliche Deformation bei 20°C
- Starke Schwankung der Deformation



Ergebnisse Optische Parameter

Deformation Seitsicht

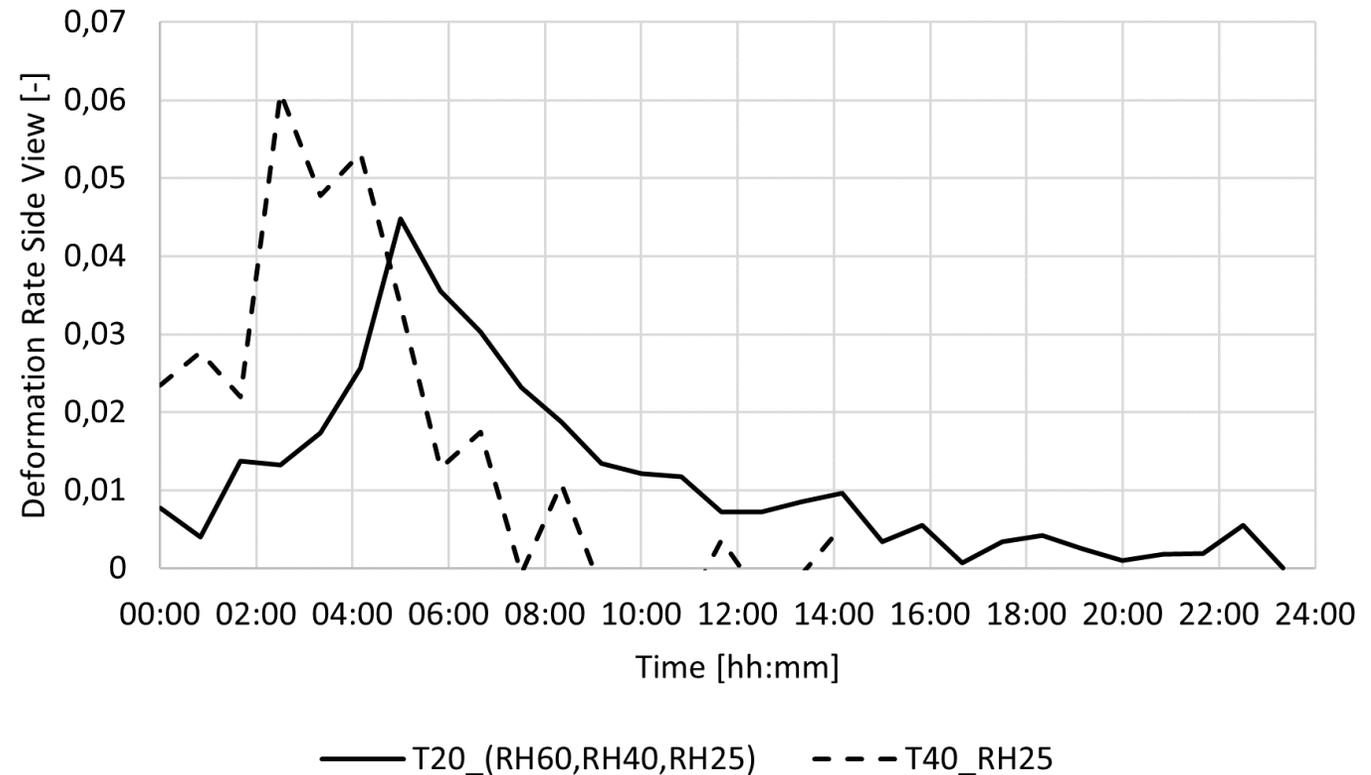
- Similar deformation at 20°C
- Starke Schwankung der Deformation



Ergebnisse Optische Parameter

Deformation Seitsicht

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

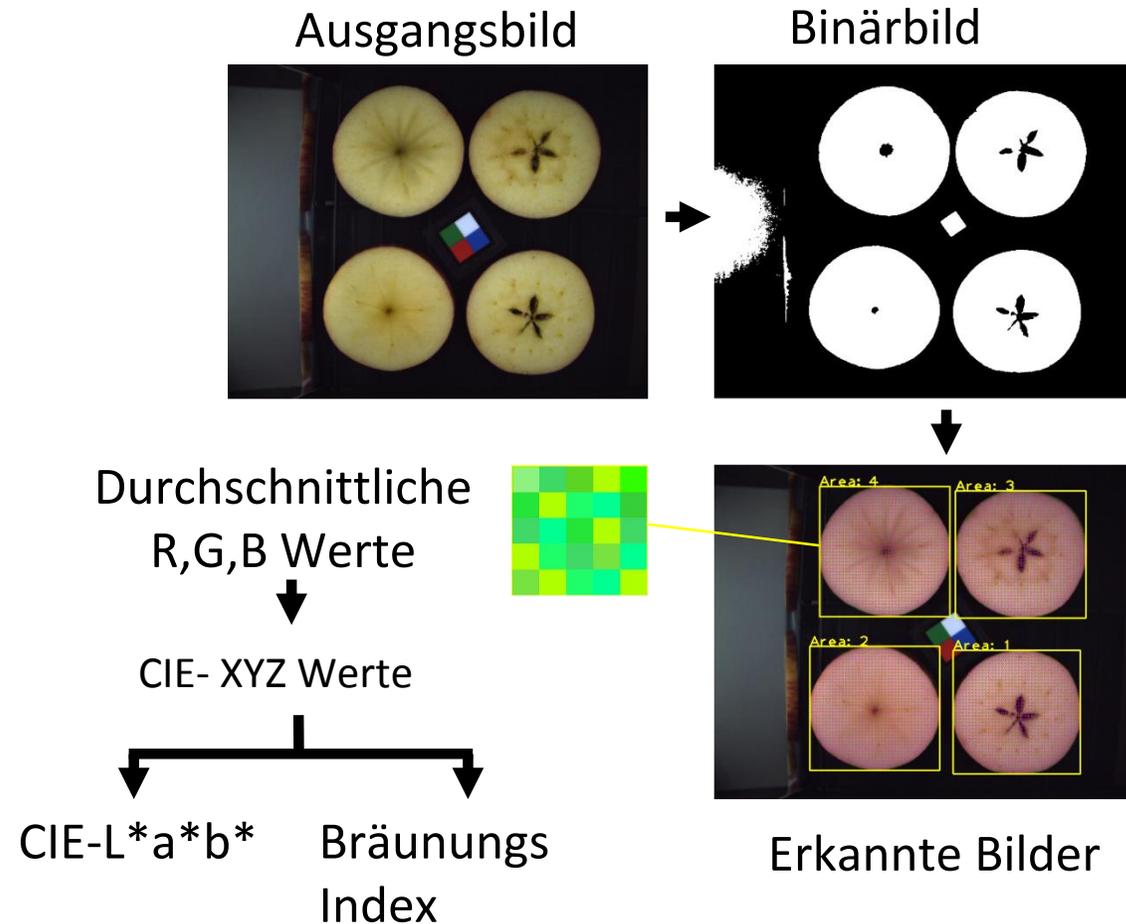


[Demo Video Deformation Seitsicht \(30sec\)](#)

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]

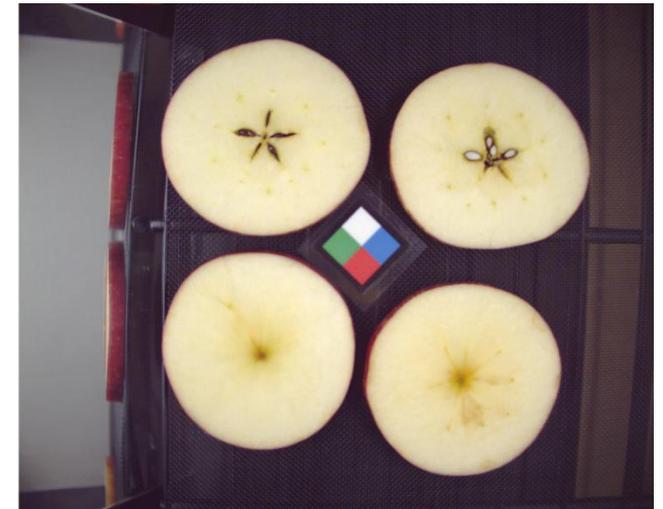
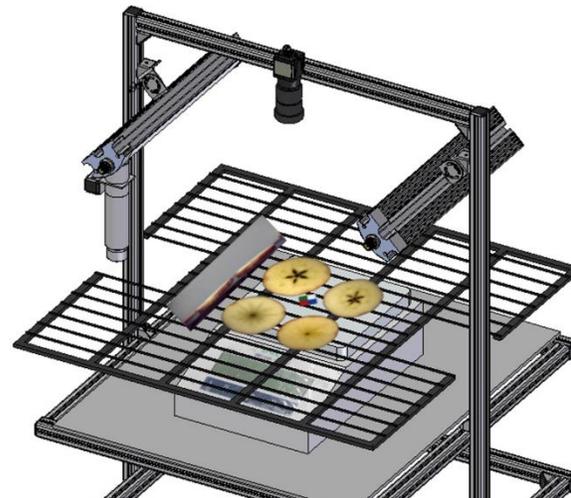


[Demo Video \(30sec\)](#)

Optische Parameter (Farbänderung)

Kalibrierung

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



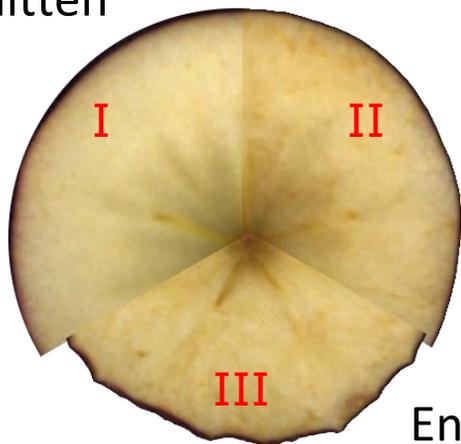
Standardabweichung von ca. 1300 Bilder von nur 3Bit → 1,1%

Optische Parameter (Farbänderung)

Farbe CIE-L Wert

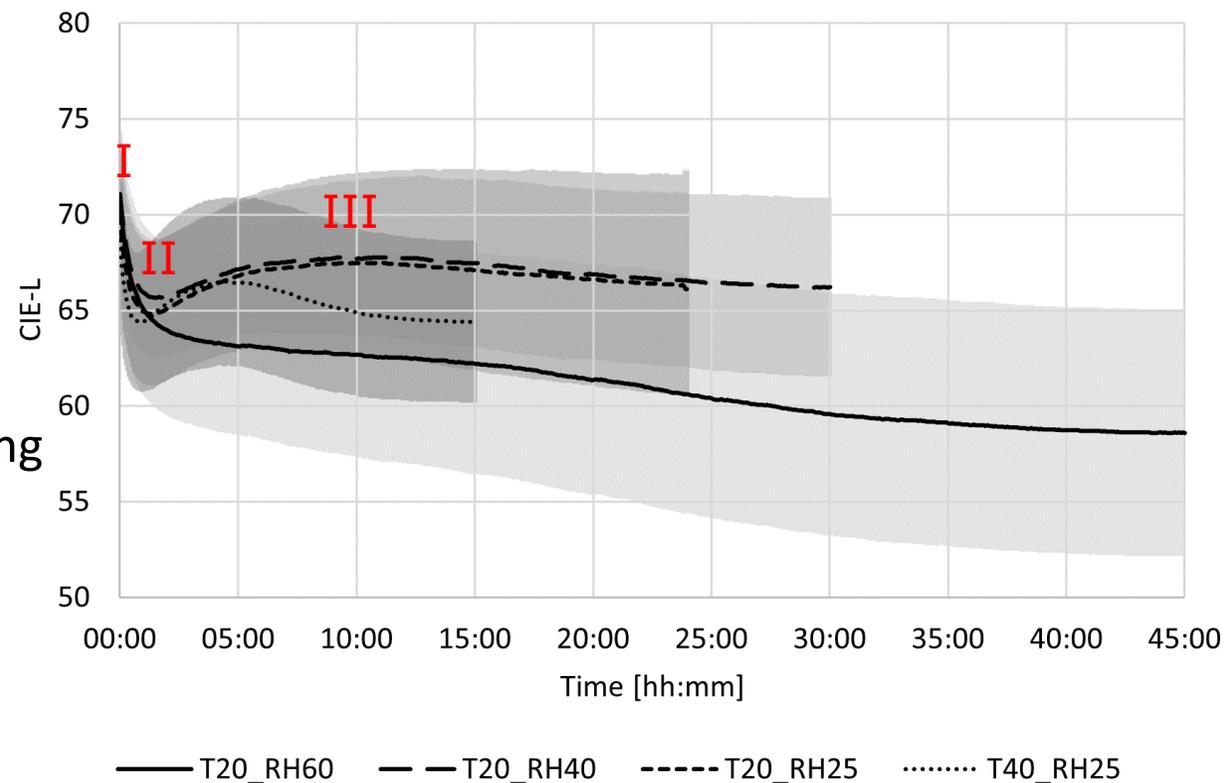
- T20_RH40 und T20_RH25 ähnlich
- Minimum nach ca. 3-4h

Frisch geschnitten



Enzymatische Bräunung
+ feuchte Mitte
(dunkel)

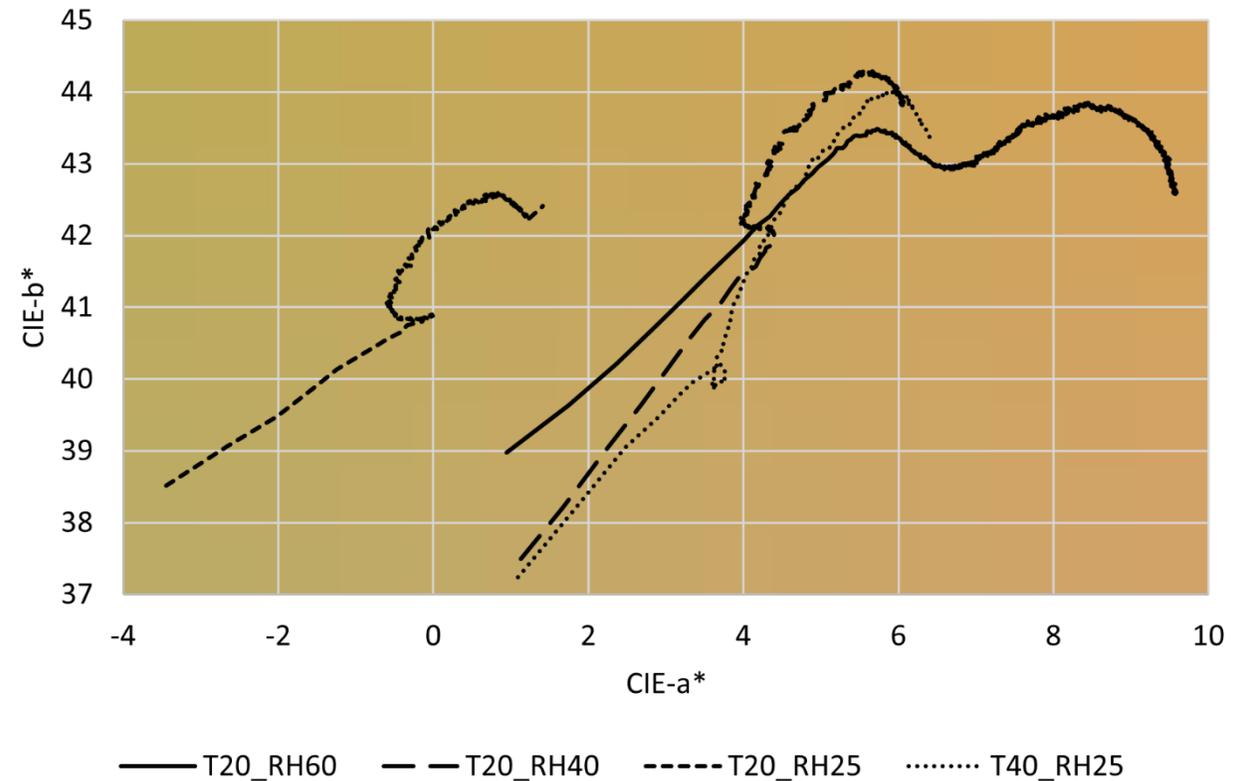
Enzymatische Bräunung
+ trockene Mitte (hell)



Ergebnisse Optische Parameter

Farbe CIE-a und CIE-b Wert

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



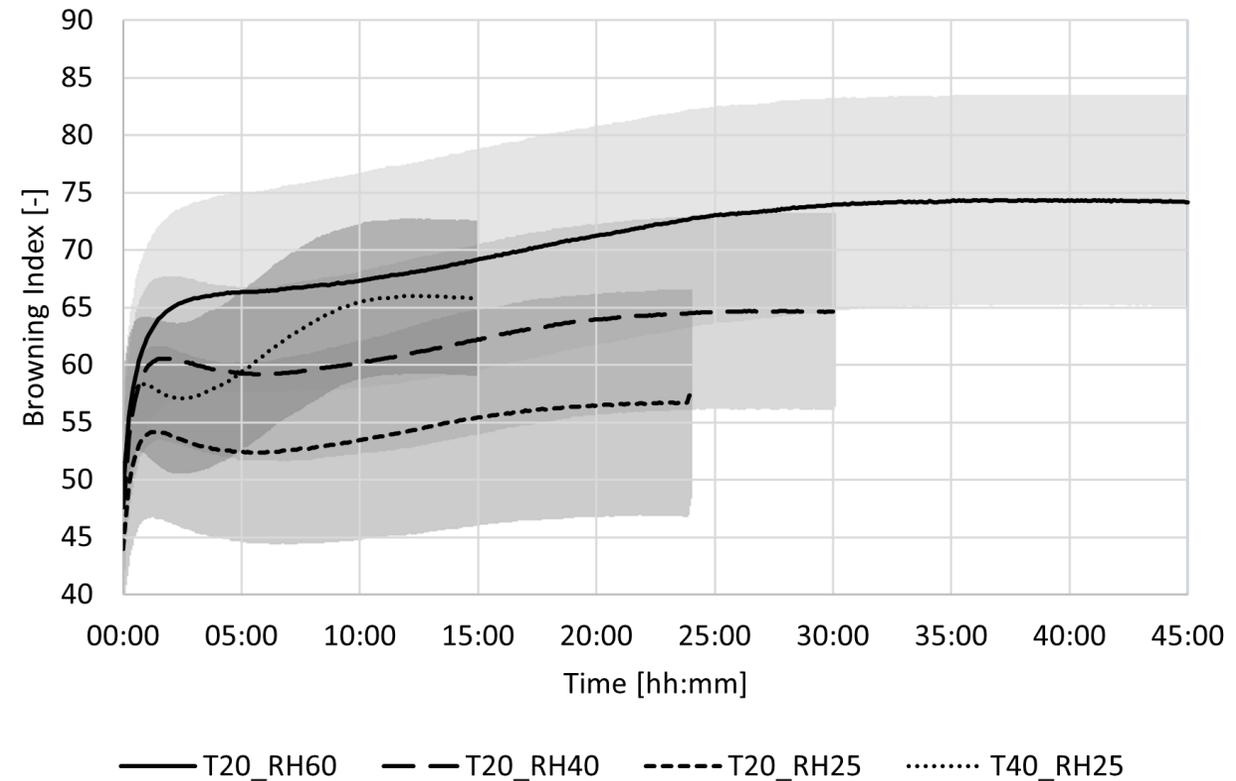
[Demo Video \(30sec\)](#)

Ergebnisse Optische Parameter

Bräunungsindex

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

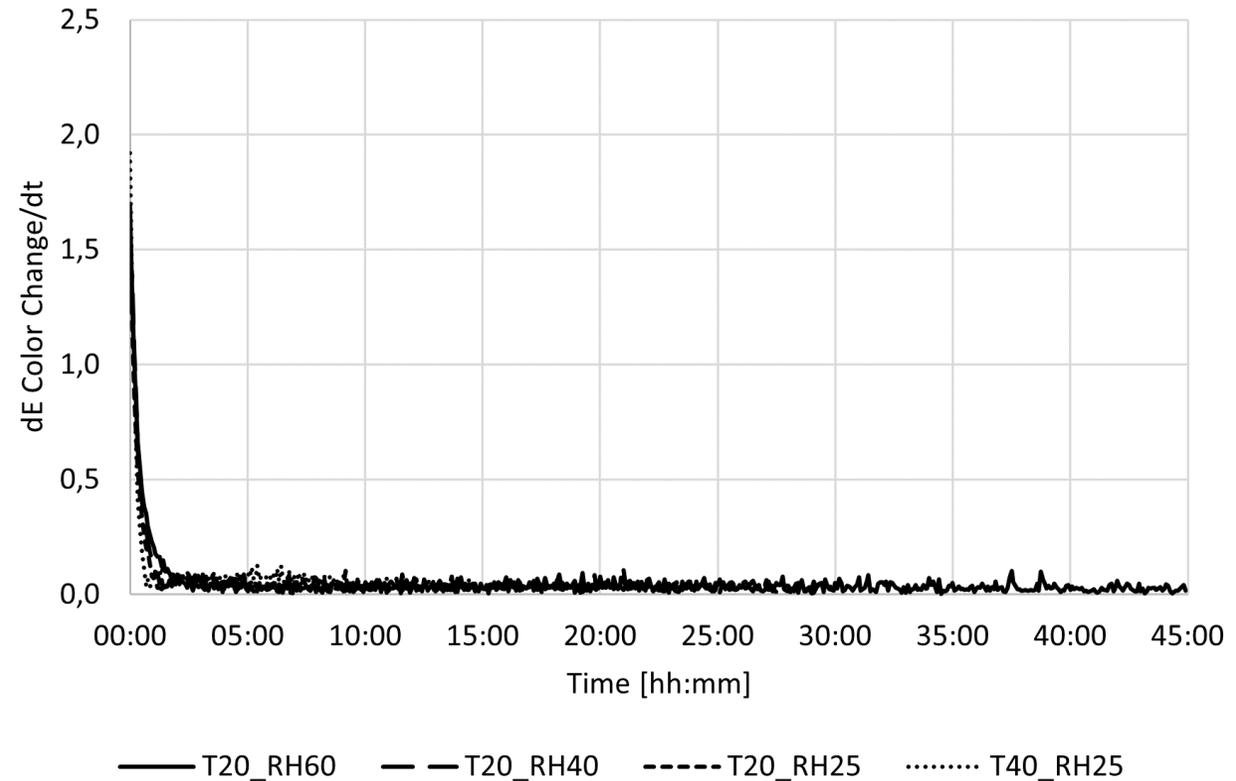
$$BI = \frac{(x_{D65} - 0,32)}{0,162} * 100$$



Ergebnisse Optische Parameter

Farbänderungsrate

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



Dynamische Trocknung

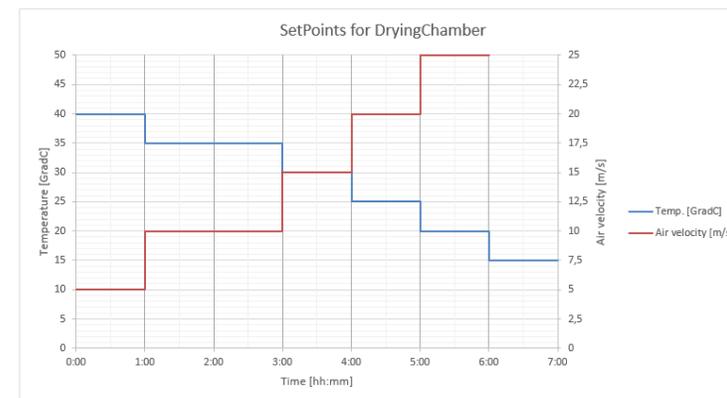
SetPointMaker

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

The screenshot shows the SetPointMaker software interface. It includes several control panels on the left for parameters like Power of Fan [Hz], T_Reference, T_Heatpump, T_Pyrometer, T_cooler-heater, RH%_Inlet, T_Inlet, RH%_Outlet, T_Outlet, and Weight. The main area contains four graphs: chart_AirVelocity, chart_Temperatures, chart_Humidity, and chart_Weight. A central Camera Preview window shows four slices of apples. The bottom right section contains camera settings like Color Temperature, Exposure, Pixel Clock, Framerate, and various output options.

update Graph
generate SetPoints



Duration: 7 std. 0 min.

Fazit

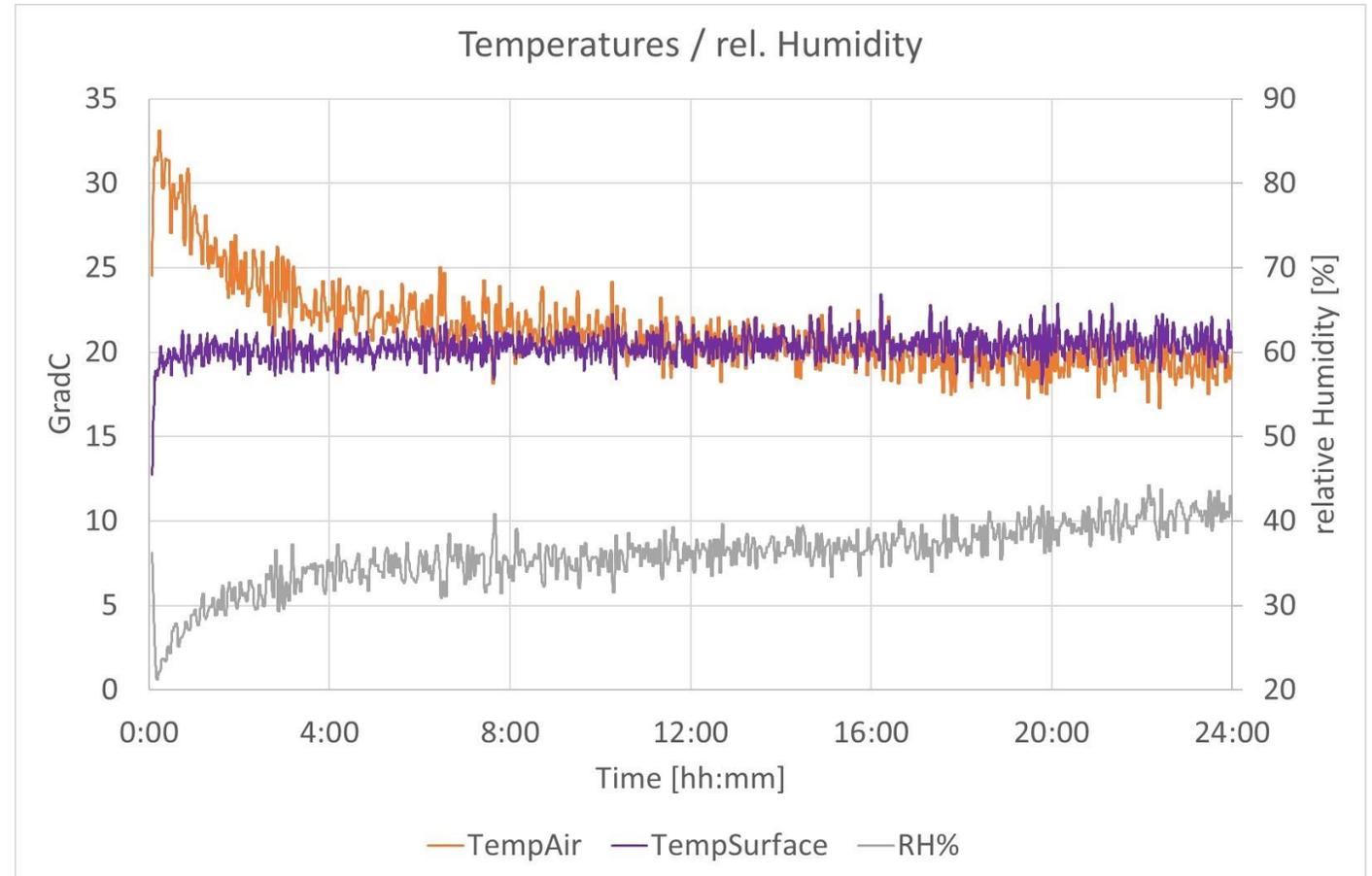
- Die Formerkennung funktioniert sehr präzise und zuverlässig (nicht nur Äpfel)
- Farbmessung erfordert eine sehr gute Bildqualität (Beleuchtungsbedingungen, Kameraeinstellungen, Schwarzwert, Weißabgleich, Farbräume, Dateiformat usw.)
- Optische Analyse direkt in LabVIEW → reagiert sofort auf optische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

Exkurs: Verbesserte Trocknungsstrategien – Konzept für Enthalpie-kontrollierte Trocknung

Erste Ergebnisse

Vorschriften

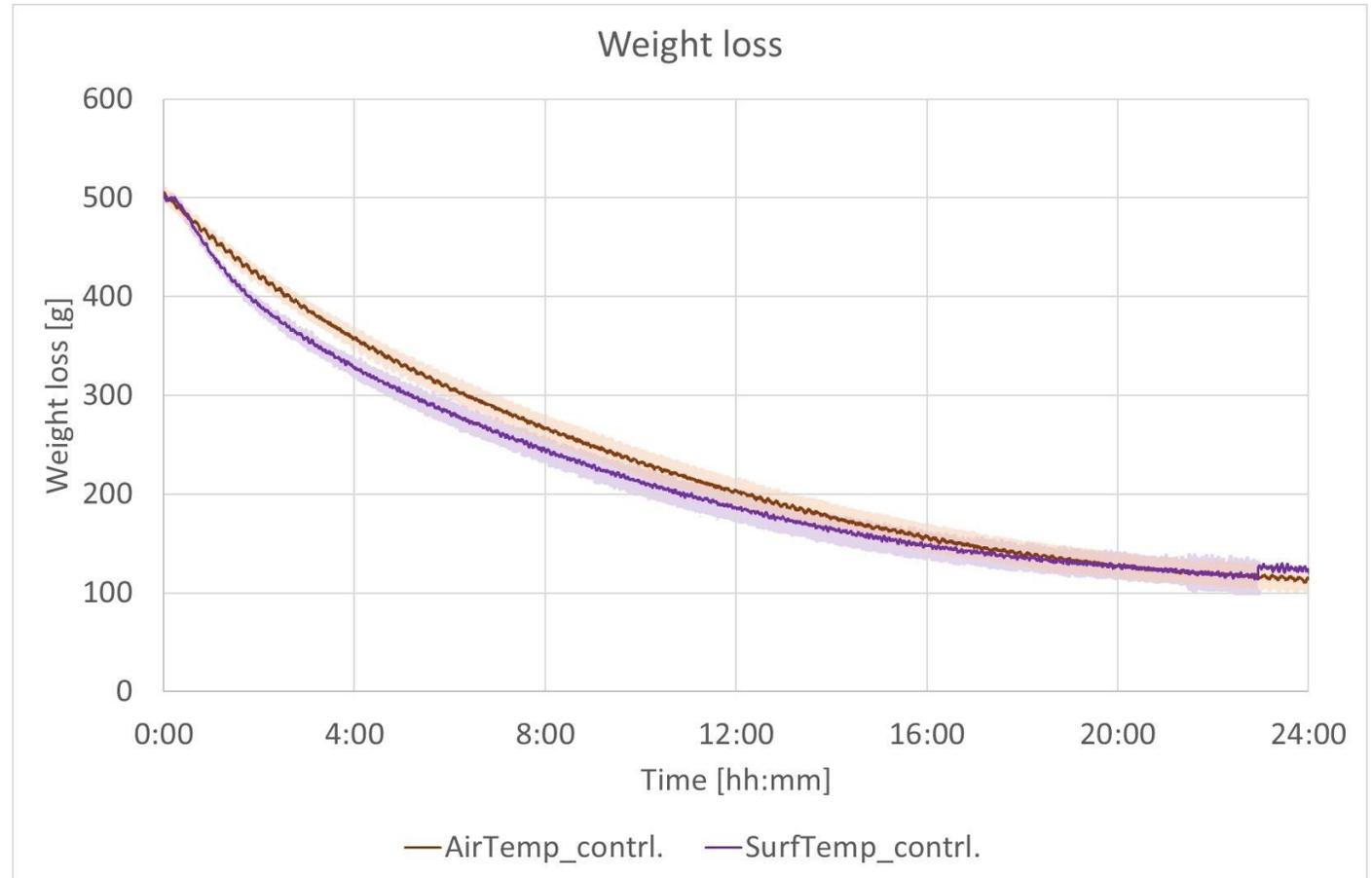
- Konstante Oberflächentemp. (und nicht konstante Trocknungstemperatur)
- Noch keine Feuchtigkeitsregulierung
- Schwankungen aufgrund von Sensorunsicherheiten



Erste Ergebnisse

Gewichtsverlust

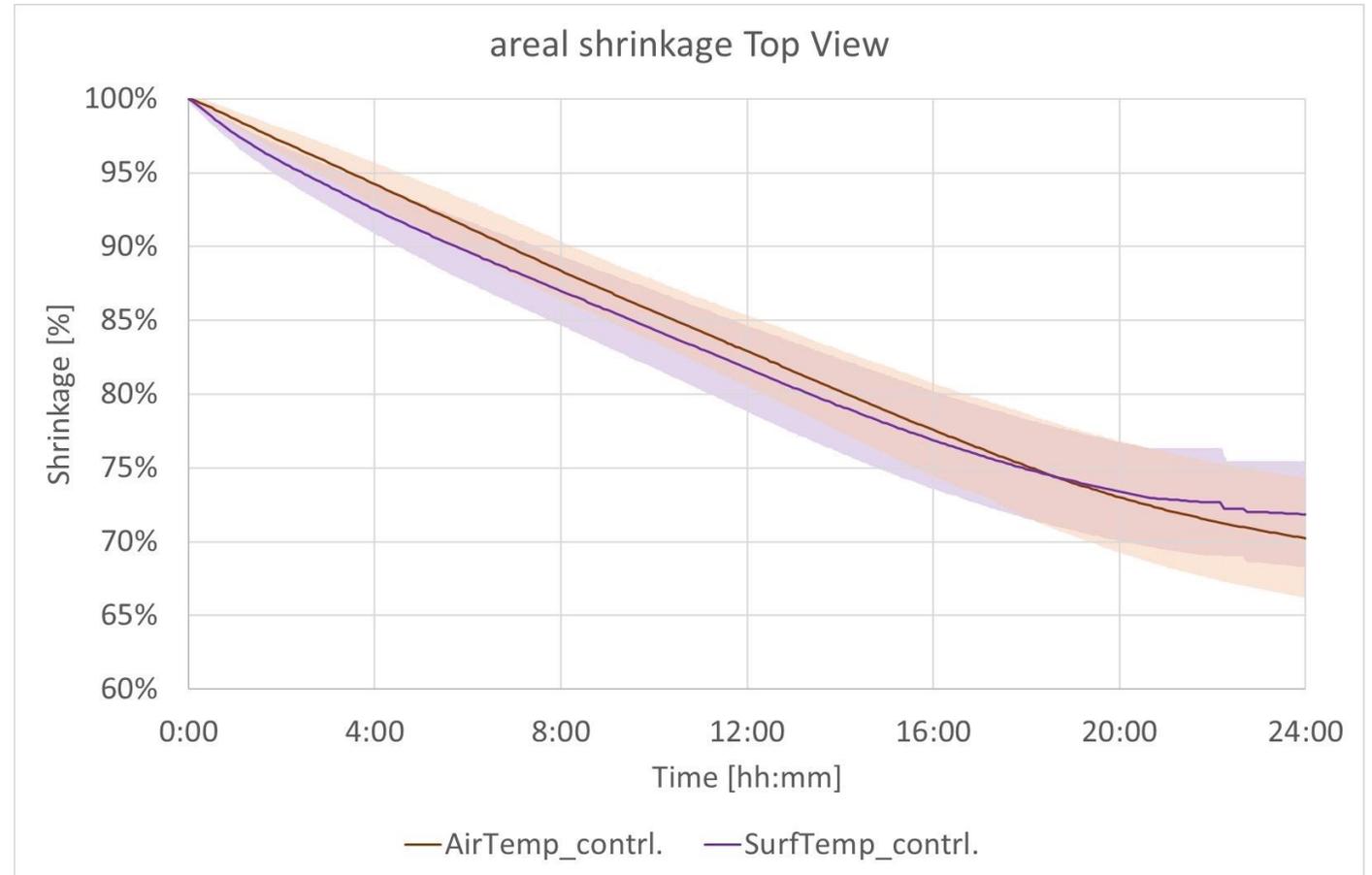
- Schnelleres Trocknen am Anfang wegen höherer Temperatur



Erste Ergebnisse

Schrumpfung Aufsicht

- Ergebnisse: Durchschnittlich 8 Apfelscheiben
- Ähnlicher Schrumpfungsfortschritt



Erste Ergebnisse

Bräunungsindex

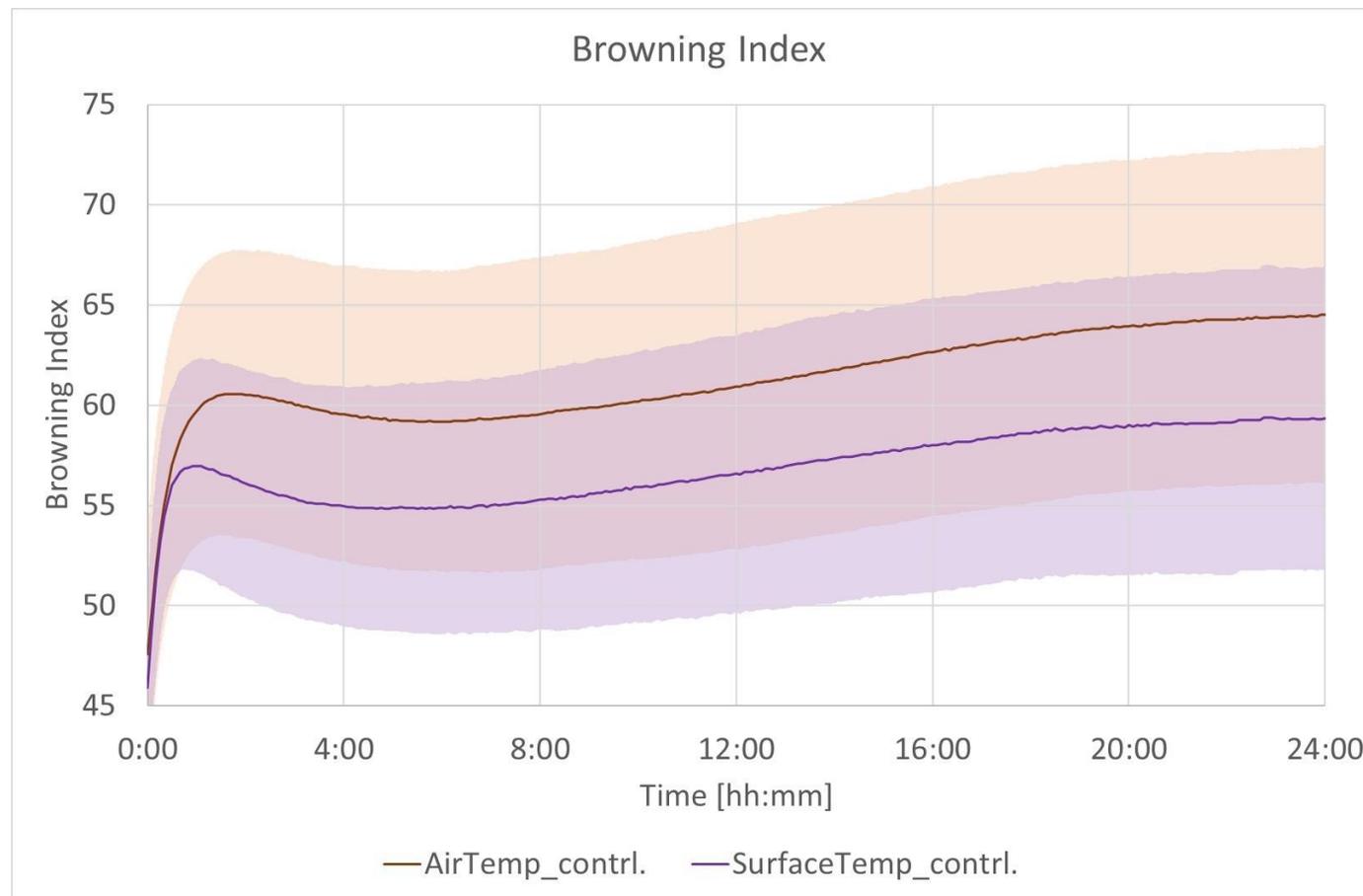
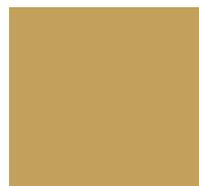
- Durchschnittlich 8 Apfelscheiben
- RGB \rightarrow XYZ \rightarrow $x = X / (X + Y + Z)$

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

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.**