

**Titel: Abschlussbericht  
Projekt 2812ERA0392 - USER-PA**

**Zuwendungsempfänger:** Ferdinand-Braun-Institut,  
Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik  
im Forschungsverbund Berlin e.V.  
Gustav-Kirchhoff-Str. 4  
12489 Berlin

**Förderkennzeichen:** FKZ 2812ERA039

**Vorhabensbezeichnung:** USability of Environmentally sound and Reliable techniques in  
Precision Agriculture (USER-PA)  
Anwendung umweltgerechter, praxistauglicher Technologien  
in der Präzisions-Landwirtschaft

**Laufzeit des Vorhabens:** 01.04.2013 – 31.12.2015

**Berichtszeitraum:** 01.04.2013 – 31.12.2015

## **Zwischenbericht**

**Institutsleiter:** Prof. Dr. G. Tränkle

**Projektleiter:** Priv.-Doz. Dr. Bernd Sumpf

**Bearbeiter:** Priv.-Doz. Dr. Bernd Sumpf, Dr. André Müller,  
Erdenetsetseg Luvsandamdin

### Soll-Ist-Vergleich der geplanten Arbeitsschritte:

Die Arbeiten im gesamten Berichtszeitraum wurden entsprechend des vorliegenden Arbeitsplans durchgeführt. Es gab keine Abweichungen vom Arbeitsplan.

Arbeitspaket	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Status
1 Auswahl geeigneter Diodenlaser	X												Erfüllt
2 Simulation des optischen Designs		X											Erfüllt
3 Aufbau und Vorcharakterisierung der Raman-Optode			X										Erfüllt
4 Einbau des portable Spektrometers			X										Erfüllt
5 Test Messungen an Referenz- und Testproben			X	X									Erfüllt
6 Test Messungen an Früchten unter Laborbedingungen				X	X								Erfüllt
7 Optimierung der Optode					X								Erfüllt
8 Qualifikation des Messsystems mit Messungen an ausgewählten Früchten und Vergleich mit Referenzanalytik						X							Erfüllt
9 Vorbereitung und Durchführung eines gemeinsamen Feldexperiments							X						Erfüllt
10 Auswertung des Feldexperiments							X	X	X				Erfüllt
11 Planung einer möglichen Integration des Messsystems in die gemeinsame Messplattform								X					Erfüllt
12 Weitere Optimierung des Messsystems										X			Erfüllt
13 Vorbereitung und Durchführung eines gemeinsamen Feldexperiments											X		Erfüllt
14 Auswertung des Feldexperiments											X	X	Erfüllt

Die Verwendung der Fördermittel erfolgte entsprechend der ursprünglichen Projektplanung (siehe **Verwendungsnachweis** vom **29.01.2016**). So wurde unter dem Punkt Invest wie geplant das oben genannte portable Spektrometer als Kernkomponente für das Messsystem erworben und bereits dort implementiert. Ebenso wurden die Verbrauchsmaterialien eingesetzt um das Messsystem zu optimieren. Reisemittel dienen zur Durchführung gemeinsamer Feldexperimente und zur Teilnahme an Konferenzen im Ausland.

Inhaltlich wurden im Einzelnen folgende Punkte erfolgreich bearbeitet:

### 1. Auswahl geeigneter Diodenlaser

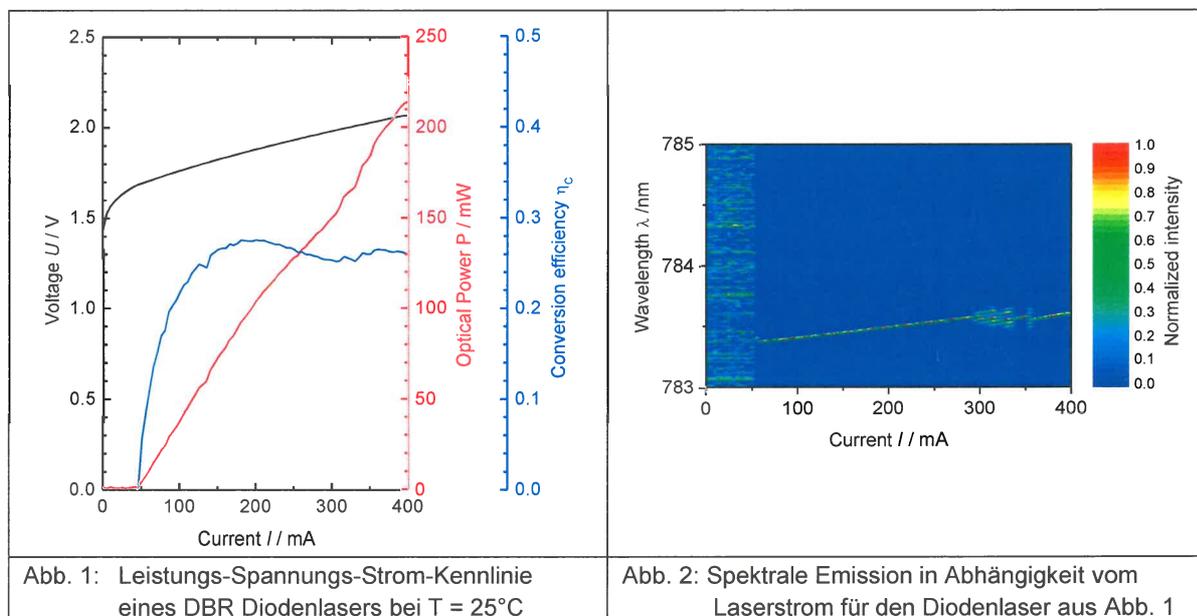
(Q1)

Für das portable Raman Messsystem werden Diodenlaser mit den folgenden Parametern benötigt.

- Emissions-Wellenlänge:  $\lambda = (785 \pm 1) \text{ nm}$
- Spektrale Breite:  $\Delta\lambda = 0.5 \text{ nm}$  ( $\Delta\tilde{\nu} = 10 \text{ cm}^{-1}$ )
- Ausgangsleistung:  $P \geq 100 \text{ mW}$
- Leistungsaufnahme:  $P_{\text{el}} \leq 1 \text{ W}$

Um die notwendige spektrale Stabilisierung über einen großen Leistungsbereich zu gewährleisten wurden Diodenlaser mit integriertem Distributed Bragg Reflektor (DBR) ausgewählt. Die Emissionswellenlänge der Diodenlaser wird dabei auf die vorgegebene Wellenlänge des Gitters stabilisiert. Das erfolgt weitgehend unabhängig von der gewählten Ausgangsleistung.

Abbildung 1 zeigt die Leistungs-Spannungs-Strom-Kennlinie eines 3 mm langen DBR Diodenlasers.



Die maximale Ausgangsleistung beträgt 215 mW bei einem Injektionsstrom von  $I = 400 \text{ mA}$ . Die im Projekt angestrebte Ausgangsleistung von 100 mW wird bereits bei  $I = 200 \text{ mA}$  und einer Spannung von  $U = 1.9 \text{ V}$  erreicht. Die Leistungsaufnahme liegt bei  $P_{\text{el}} = 380 \text{ mW}$  und damit deutlich unter der Projektzielstellung von 1 W. Der Laser besitzt an diesem Arbeitspunkt eine Konversionseffizienz von 26%.

Die Abhängigkeit der spektralen Emission vom Anregungsstrom ist in Abbildung 2 gezeigt. An der Laserschwelle emittiert der Laser bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 783.49 \text{ nm}$ . Mit zunehmendem Strom verschiebt sich die Wellenlänge zu größeren Werten und erreicht bei 100 mA einen Wert von  $\lambda = 783.57 \text{ nm}$ . Die Änderung beträgt 0,08 nm. Die spektrale Breite beträgt  $\Delta\lambda = 0.02 \text{ nm}$  ( $0.3 \text{ cm}^{-1}$ ) und ist damit deutlich geringer als benötigt. Die etwas kürzere Wellenlänge im Vergleich zu den Zielspezifikation von 783.50 nm ist vertretbar und hat keinen Einfluss auf die weiteren Arbeiten.

Der Diodenlaser hat eine Fernfeldbreite von  $21^\circ$  ( $1/e^2$ -level) und eine Nahfeldbreite von  $4 \mu\text{m}$ . Die Emission erfolgt nahezu Beugungsbegrenzt mit einer lateralen Strahlqualität von  $M_{1/e2}^2 = 1.3$ .

Der Laser erfüllt die Anforderungen des Projektes für Raman-spektroskopische Messungen an Früchten und Pflanzen innerhalb USER-PA.

**Die Arbeiten in diesem Arbeitspaket erfolgten entsprechend der ursprünglichen Planung. Sie sind erfolgreich abgeschlossen.**

## 2. Simulation des optischen Designs der Optode (Q2)

Basierend auf den experimentell bestimmten Strahlparametern für den unter Punkt 1 gezeigten Diodenlaser erfolgte das optische Design der Raman-Optode unter Verwendung des Programms WinABCD ([www.fbh-berlin.de](http://www.fbh-berlin.de)). Ziel der Simulationen war eine Optik auszuwählen, die eine effiziente Anregung des Raman-Effekts und eine effiziente Sammlung der Raman-Photonen in einem kompakten portablen Messsystem erlaubt. Das Schema des optischen Systems und des portable Raman-Setups ist in den Abbildungen 3 A und 3 B gezeigt.

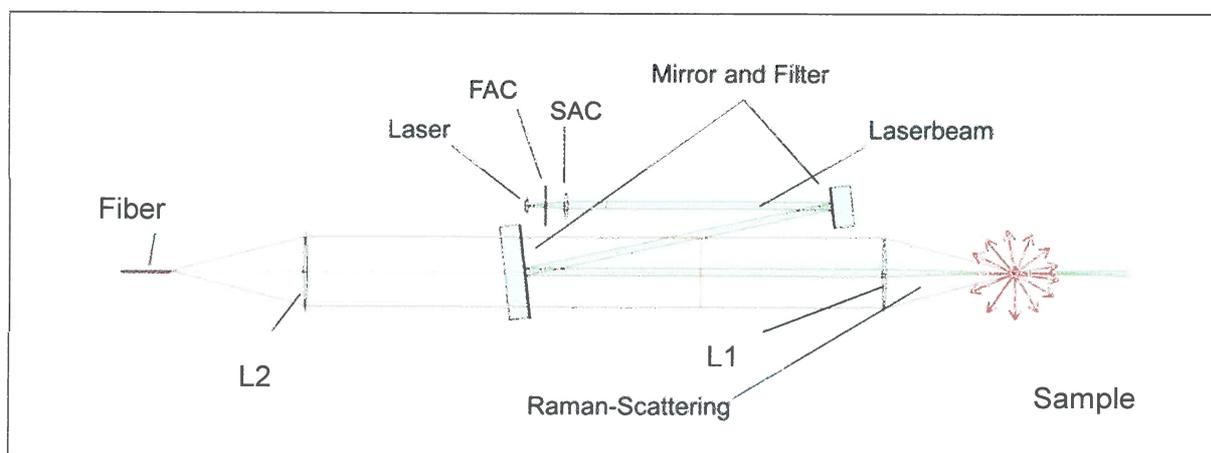


Abb 3.A: Abbildungssystem und simulierter Strahlverlauf für das Raman-Messsystem

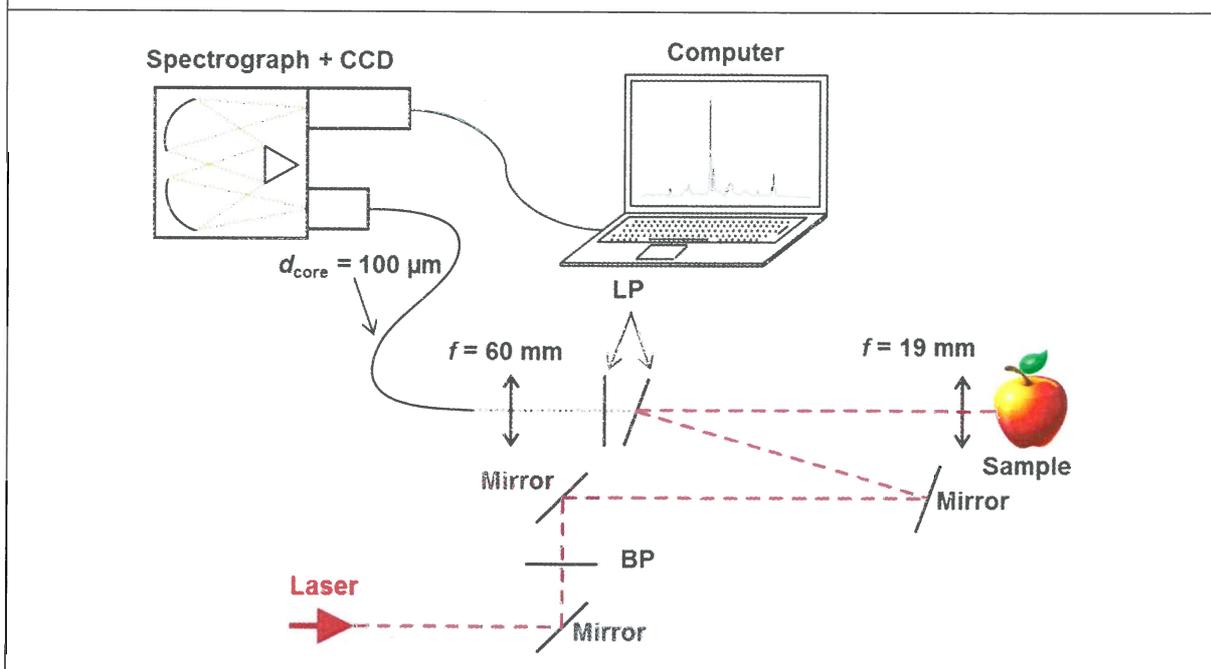


Abb 3.B: Schema des portable Raman-Systems für die Messungen an Früchten unter Feldbedingungen: BP - Bandpass Filter, LP - Langpass Filter.

Das emittierte Licht wird in vertikaler und lateraler Richtung unter Verwendung von Fast-axis (FAC,  $f = 0,7$  mm) und Slow-axis (SAC,  $f = 1,5$  mm) Kollimationslinsen abgebildet. Ein Laserbandpassfilter (BP) dient zur Unterdrückung der spontan verstärkten Emission außerhalb der Laserwellenlänge. Spiegel und ein dielektrischer Langpassfilter (LP) bilden den Strahl auf die Linse L1 mit einer Brennweite  $f_1 = 19$  mm ab, die die Anregungsstrahlung auf die Probe fokussiert. In einer 180°-Rückstreuengeometrie werden die Raman-Photonen mit der Linse L1 eingesammelt und auf zwei LP abgebildet. Die beiden LP dienen dazu das Laserlicht und das Anti-Stokes-Licht zu reflektieren. Das spektral langwellig verschobene Stokes-Licht passiert beide Filter und wird über eine Linse L2 mit einer Brennweite von  $f_2 = 60$  mm in eine optische Faser mit einem Kerndurchmesser von 100  $\mu\text{m}$  eingekoppelt. Über die Faser werden die Raman-Signale an das portable Spektrometer geleitet. Ein Computer dient zur Steuerung der Geräte und zur Datenerfassung.

**Die Arbeiten in diesem Arbeitspaket erfolgten entsprechend der ursprünglichen Planung. Sie sind erfolgreich abgeschlossen.**

### 3. Aufbau und Vorcharakterisierung der Raman-Optode (Q3)

Der realisierte optische Aufbau ist in der Abb. 4 gezeigt. Der Diodenlaser und alle optischen Elemente sind auf einem Breadboard mit einer Größe von 450 mm x 300 mm untergebracht.

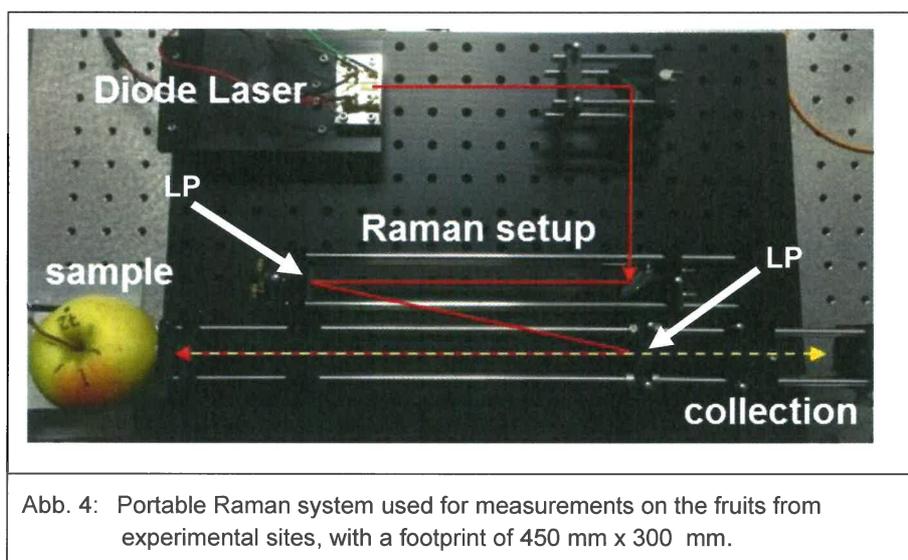


Abb. 4: Portable Raman system used for measurements on the fruits from experimental sites, with a footprint of 450 mm x 300 mm.

**Das gezeigte optische System wurde zusammen mit einer geeigneten Ansteuer- und Messelektronik für die weiteren Arbeiten entsprechend der Projektplanung eingesetzt.**

### 4. Einbau des portable Spektrometers (Q3)

Für die Arbeiten im Project wurde das portable Raman Spektrometer HyperFlux U1 Spektrometer der Firma Tornado Spectral Systems erworben. Dieses kompakte Spektrometer ist in Abbildung 5 gezeigt und für Feldmessungen geeignet. Über die in Absatz 2 genannte Faser ist das Spektrometer mit dem Aufbau verbunden.

**Das Spektrometer ist in das optische System aus Abschnitt 3 integriert und wurde für weitere Arbeiten entsprechend der Projektplanung eingesetzt.**

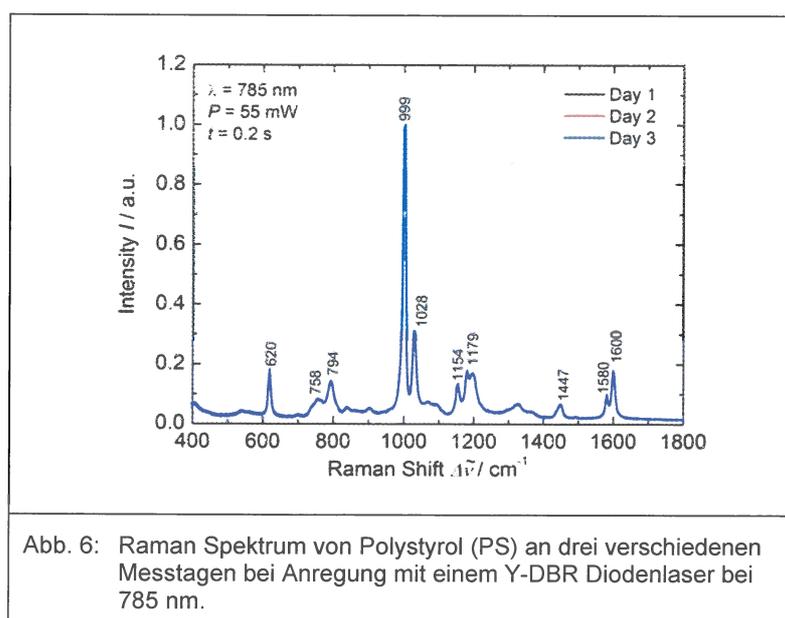


### 5. Test Messungen an Referenz- und Testproben

(Q3-Q4)

Innerhalb des Arbeitspaketes wurde die am FBH entwickelte Raman-Optode in Betrieb genommen und ihre Eigenschaften im Vergleich mit einem Laborsystem untersucht. Dazu wurden erste Raman Messungen an Testproben durchgeführt um u.a. die spektrale Stabilität des Systems zu verifizieren.

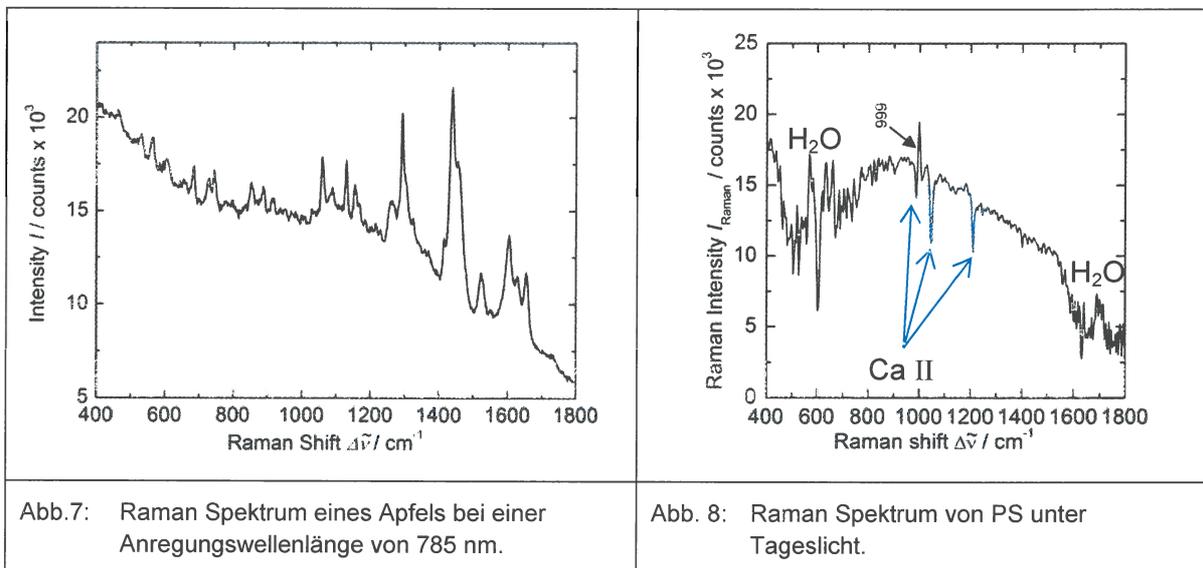
Als Beispiel hierfür zeigt Abb. 6 ein Raman Spektrum von Polystyrol (PS) als Referenz Probe. Alle Raman Linien von PS werden im gezeigten Messbereich spektral aufgelöst und die Positionen sind anhand von Literaturwerten zugeordnet worden. Über einen Messzeitraum von drei Tagen sind die Messungen exakt reproduzierbar (Day 1, Day 2, Day 3). Eine einmalige spektrale Kalibrierung an Tag 1 war ausreichend, keine Re-Kalibrierung wird benötigt und die Stabilität ermöglicht einen zuverlässigen Einsatz des Messsystems über mehrere Tage z.B. in Feldexperimenten.



**Die Arbeiten in diesem Arbeitspaket erfolgen entsprechend der ursprünglichen Planung. Sie sind erfolgreich abgeschlossen.**

## 6. Test Messungen an Früchten unter Laborbedingungen (Q4-Q5)

Mit dem an Referenzproben qualifizierten Messaufbau wurden Labormessungen u. a. gemeinsam mit dem Projektpartner Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. durchgeführt. Mehr als 3000 Spektren wurden von 45 Äpfeln an drei Messtagen aufgenommen. Ein Beispielspektrum, angeregt bei 785 nm, zeigt Abb. 7. Neben charakteristischen Raman-Linien ist ein hohes Untergrundsignal zu erkennen. Ein Grund hierfür können Fluoreszenzsignale sein, die bis in den nah-infraroten (NIR) Spektralbereich messbar sind und schwache Raman-Linien überlagern und eine Auswertung erschweren können. Dieses Testspektrum wurde ebenfalls an die anderen Projektpartner geschickt um das entsprechende Datenformat in das FMIS zu implementieren. Die Arbeiten hierzu werden fortgesetzt wobei der Schwerpunkt auf der Auswertung der gemessenen Daten und dem Vergleich mit Referenzanalytik liegen wird.



In USER-PA soll das vom FBH entwickelte Raman-Messsystem für Feldexperimente eingesetzt werden. Aufgrund dessen wurde das Messsystem unter Tageslichtbedingungen getestet. Als Messprobe wurde hier die Referenzsubstanz PS genutzt. Abbildung 8 zeigt ein Raman-Spektrum von PS unter Tageslichteinfluss. Das Raman-Spektrum zeigt im Gegensatz zu Abbildung 6 einen hohen breitbandigen Störuntergrund mit schmalbandigen Absorptionslinien von atmosphärischem Wasserdampf und Fraunhofer-Linien von einfach-ionisiertem Calcium (Ca II) aus dem Sonnenspektrum. Nur die starke Raman-Linie von PS bei  $999\text{ cm}^{-1}$  ist sichtbar.

Der Einfluss von Fluoreszenzsignalen und Tageslicht kann insbesondere bei einem Einsatz des portablen Raman-Messsystems in Feldexperimenten eine Herausforderung an die Messung und Auswertung von Raman-Signalen stellen. Eine Eliminierung bzw. Unterdrückung der Störeinflüsse wurde während der Optimierung des Messsystems berücksichtigt.

**Die Arbeiten in diesem Arbeitspaket erfolgten entsprechend der ursprünglichen Planung. Sie sind erfolgreich abgeschlossen.**

## 7. Optimierung der Optode

(Q5)

Die aus dem Arbeitspaket „Test Messungen an Früchten unter Laborbedingungen“ gewonnenen Ergebnisse wurden für die Optimierung des am FBH entwickelten portablen Raman-Messsystems genutzt. Hierbei wurde berücksichtigt dass Störsignale wie Fluoreszenz und Tageslicht insbesondere unter Feldmessbedingungen ein Raman-Spektrum überlagern und stören können und somit eine Auswertung der Raman-Signale erschwert wird.

Eine bereits erfolgreich demonstrierte spektroskopische Technik zur Trennung der Raman-Signale von Störsignalen ist die sogenannte „Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy (SERDS)“. Hierbei werden zwei Raman-Spektren mit zwei leicht voneinander verschobenen Anregungswellenlängen erzeugt. Die Raman-Signale folgen der spektralen Verschiebung der Anregungswellenlänge. Die spektrale Lage von Störlicht, wie z.B. Fluoreszenz oder Tageslicht verändert sich hierbei kaum. Subtrahiert man beide Raman-Spektren können die Raman-Signale vom Störuntergrund getrennt werden.

Als Anregungslichtquelle für SERDS wird somit ein Laser benötigt der alternierend Laserlicht mit zwei unterschiedlichen Wellenlängen erzeugt.

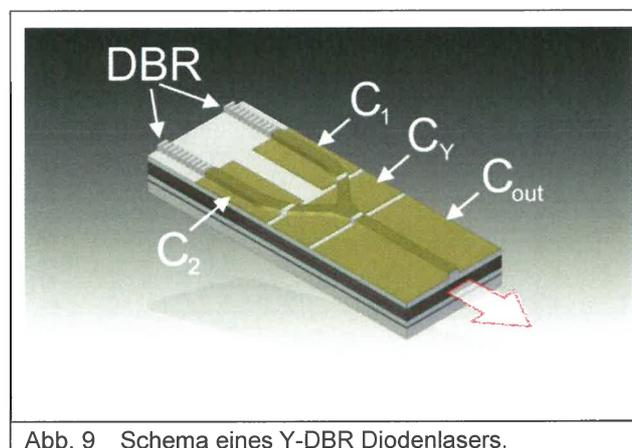


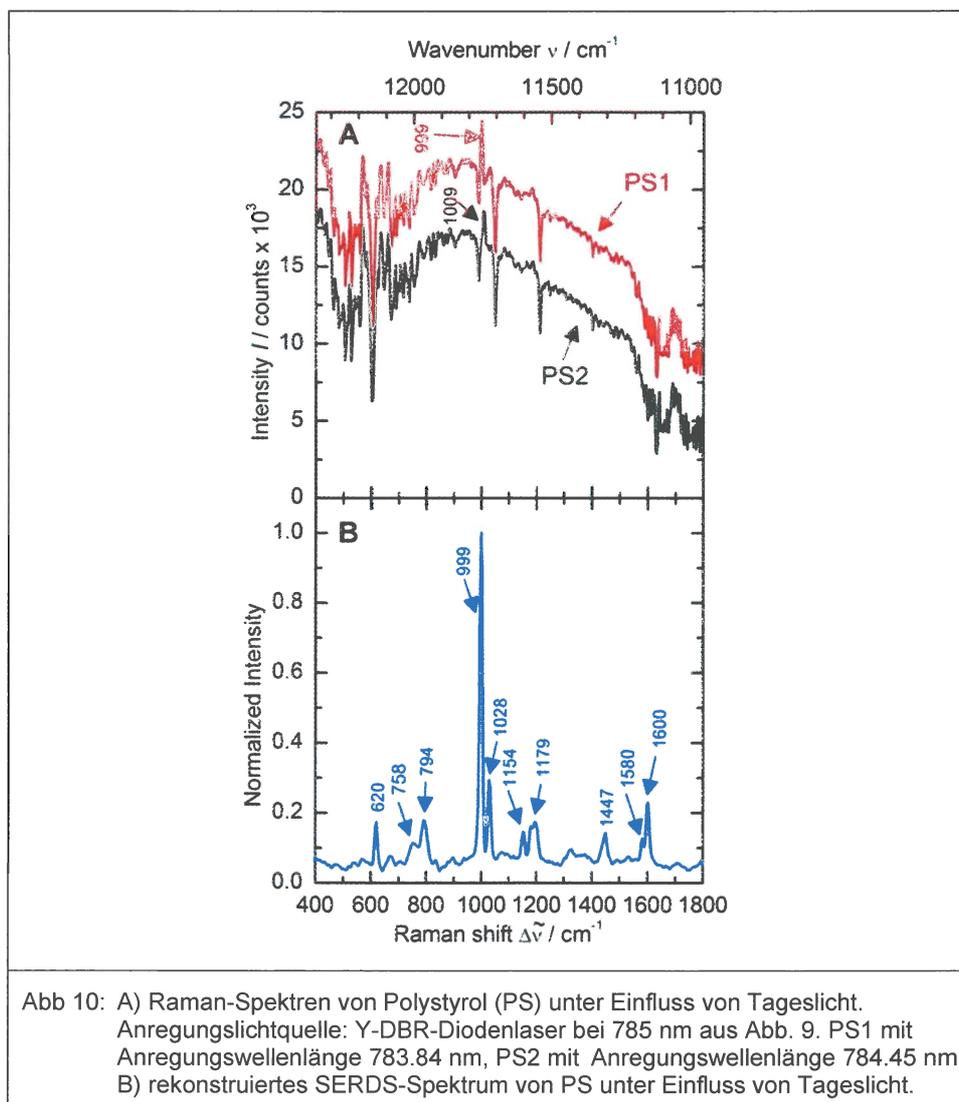
Abb. 9 Schema eines Y-DBR Diodenlasers.

Aufgrund dessen wurde als Anregungslichtquelle in das Raman-Messsystem ein Y-DBR Diodenlaser bei 785 nm eingesetzt. Eine schematische Darstellung der Anregungslichtquelle befindet sich in Abbildung 9. Für eine Wellenlängenstabilisierung sind auf der Rückseite des Halbleiterlasers zwei distributed Bragg reflector (DBR) Gitter implementiert. Die DBR-Gitter bilden mit der Frontfacette des Diodenlasers jeweils einen Laserresonator. Die Gitterperioden beider DBR-Gitter wurden so gewählt, dass hier ein spektraler Abstand des generierten Laserlichts mit ca. 0,6 nm für SERDS erzeugt wird. Ein Y-Koppler leitet das erzeugte Laserlicht in einen gemeinsamen Wellenleiter zur Austrittsfacette des Diodenlasers. Elektrische Kontakte  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_Y$  und  $C_{out}$  erlauben eine separate Ansteuerung der Kavitäten und somit die Kontrolle beider Anregungswellenlängen. Mit Hilfe eines Y-Lasers können dementsprechend Raman-Spektren und darüber hinaus SERDS-Spektren generiert werden. Der oben beschriebene Y-Laser wurde in die in Abschnitt 3 beschriebene Raman-Optode als Anregungslichtquelle integriert. Die somit optimierte Raman-Optode wurde anhand von Raman-Messungen an ausgewählten Früchten qualifiziert.

**Die Arbeiten in diesem Arbeitspaket erfolgten entsprechend der ursprünglichen Planung. Sie sind erfolgreich abgeschlossen.**

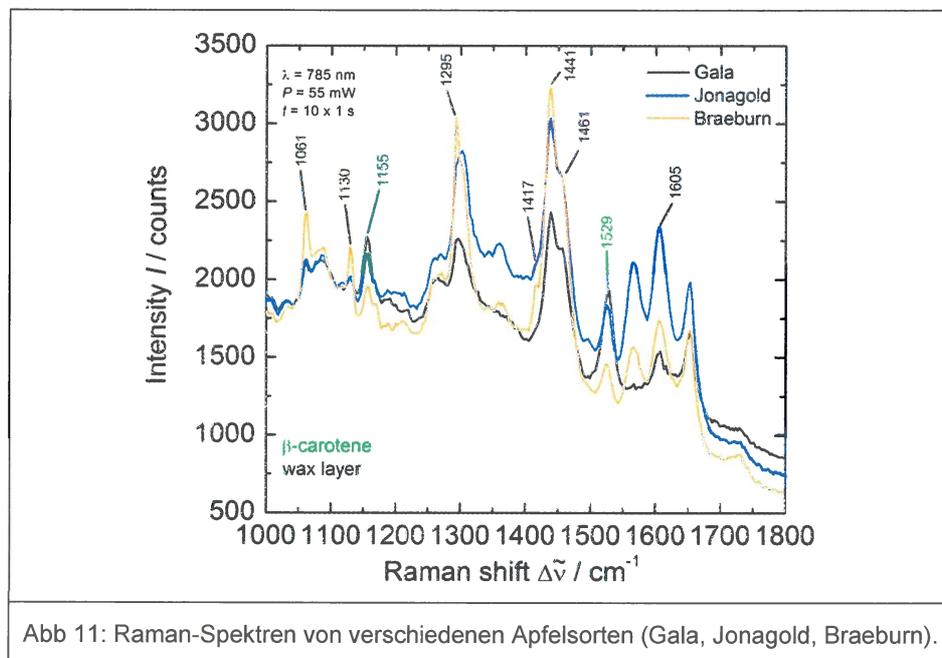
## 8. Qualifikation des Messsystems mit Messungen an ausgewählten Früchten und Vergleich mit Referenzanalytik (Q6)

Um im Vorfeld die Tauglichkeit des Raman-Messsystems unter realen Feldeinsatzbedingungen und somit unter Tageslichtbedingungen zu überprüfen, wurde wiederum die Referenzprobe Polystyrol (PS) als Testprobe eingesetzt. Raman-Spektren von PS unter Tageslicht sind in Abbildung 10 A gezeigt. Als Anregungslichtquelle wurde hier der oben genannte Y-DBR Laser bei 785 nm und die dementsprechend optimierte Raman-Optode genutzt. In Abbildung 10 A sind zwei Raman-Spektren (PS1, PS2) mit zwei benachbarten Anregungswellenlängen des Y-DBR-Diodenlasers generiert worden. Das Raman-Spektrum PS1 hat zur Übersicht in der Intensität ein Offset von 5000 counts. Beide Raman-Spektren zeigen wie in Abbildung 8 einen hohen Störuntergrund mit den bereits beschriebenen schmalbandigen Absorptionslinien von Wasserdampf aus der Atmosphäre und Fraunhofer-Linien von einfach-ionisiertem Calcium (Ca II) aus dem Sonnenspektrum.



Auch hier ist nur die starke Raman-Line bei  $999\text{ cm}^{-1}$  in PS1 sichtbar. Im Raman-Spektrum PS2 ist dieses Raman-Signal mit der Laserwellenlänge um  $10\text{ cm}^{-1}$  auf  $1009\text{ cm}^{-1}$  spektral verschoben. Die Untergrundsignale in PS1 und PS2 sind nahezu gleich. Beide Raman-Spektren PS1 und PS2 wurden voneinander subtrahiert. Das daraus entstehende Differenz-Signal (SERDS-Signal) ist anschließend integriert worden. Dieses rekonstruierte SERDS-Signal ist in Abbildung 10 B dargestellt. Hier sind alle Raman-Signale von PS im Messbereich vom Störuntergrund getrennt und klar sichtbar. Die Raman-Linien sind spektral aufgelöst und die Positionen können wie in Abbildung 6 anhand von Literaturwerten identifiziert werden.

Zur Qualifizierung des optimierten Messsystems wurden Raman-Spektren mit verschiedenen Apfelsorten (Gala, Jonagold, Braeburn) unter Laborbedingungen gemessen. Als Beispiel sind in Abbildung 11 Raman-Spektren der genannten Apfelsorten dargestellt. Hierbei sind alle Raman-Signale im gezeigten Messbereich klar sichtbar und spektral aufgelöst. Raman-Signale von der Wachsschicht der Apfelschale und von  $\beta$ -Karotin konnten anhand von Literaturwerten zugeordnet und identifiziert werden. Diese Signale können zur Auswertung gemessener Raman-Spektren während der Feldtestmessungen herangezogen werden.



Die optimierte Raman-Optode ist somit für Raman-Messungen an Äpfeln geeignet und ermöglicht mit SERDS darüber hinaus die Trennung von Raman-Signalen und Störsignalen wie Tageslicht und eröffnet einen Einsatz des Messsystems unter realen Feldmessbedingungen.

**Die Arbeiten in diesem Arbeitspaket erfolgten entsprechend der ursprünglichen Planung. Sie sind erfolgreich abgeschlossen.**

## 9. Vorbereitung und Durchführung eines gemeinsamen Feldexperiments (Q7)

Im September 2014 wurden gemeinsame Feldexperimente beim Projektpartner an der Fachhochschule Westschweiz in Changins durchgeführt. Der realisierte optische Aufbau der eingesetzten Raman-Optode aus Abschnitt 3 zusammen mit einer geeigneten Ansteuer- und Messelektronik sowie ein Laptop zur Kontrolle Messdatenerfassung ist in der Abb. 12 gezeigt. Der Y-Diodenlaser und alle optischen Elemente sind auf einem Breadboard mit einer Größe von 450 mm x 300 mm untergebracht.



Abb. 12: Portable Raman-Optode im Laboreinsatz während der gemeinsamen Feldexperimente an der Fachhochschule Westschweiz in Changins im September 2014.

Während der Feldexperimente wurden 126 Äpfel von 21 Bäumen der Apfelplantage für die Untersuchungen ausgewählt, gepflückt und von der Plantage zur Fachhochschule transportiert um dort die entsprechenden Raman-Messungen im Labor durchzuführen. An jedem Apfel der Sorte Gala wurden an drei äquidistanten Stellen entlang der Äquatorebene des Apfels Raman-Messungen durchgeführt. Während der gesamten Feldexperimente arbeitete die Raman-Optode stabil und einwandfrei.

**Die Arbeiten in diesem Arbeitspaket erfolgten entsprechend der ursprünglichen Planung. Sie sind erfolgreich abgeschlossen.**

## 10. Auswertung des Feldexperiments (Q7-Q9)

Die während der Feldexperimente gewonnenen Messdaten wurden ausgewertet. Hierbei wurden u.a. die Signalintensitäten einzelner Raman-Linien den gemessenen Äpfeln zugeordnet.

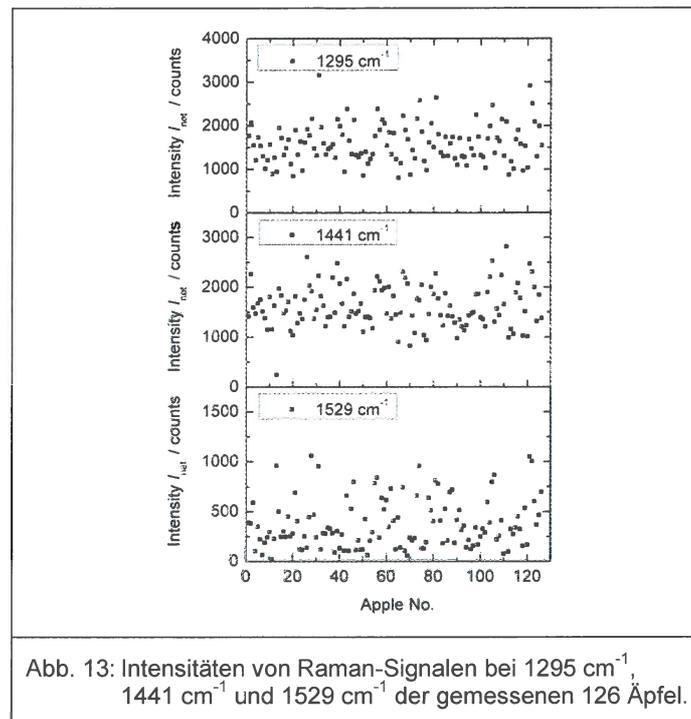


Abb. 13: Intensitäten von Raman-Signalen bei  $1295\text{ cm}^{-1}$ ,  $1441\text{ cm}^{-1}$  und  $1529\text{ cm}^{-1}$  der gemessenen 126 Äpfel.

In Abbildung 13 sind die Netto-Intensitäten ausgewählter gemessenen Raman-Signale beispielhaft bei  $1295\text{ cm}^{-1}$  (Wachsschicht),  $1441\text{ cm}^{-1}$  (Wachsschicht) und  $1529\text{ cm}^{-1}$  ( $\beta$ -Karotin) den durchnummerierten Äpfeln zugeordnet. Hierbei wurden die Ergebnisse auch mit Ergebnissen der Projektpartner verglichen.

**Die Arbeiten in diesem Arbeitspaket erfolgten entsprechend der ursprünglichen Planung.**

### **11. Planung einer möglichen Integration des Messsystems in die gemeinsame Messplattform (Q8)**

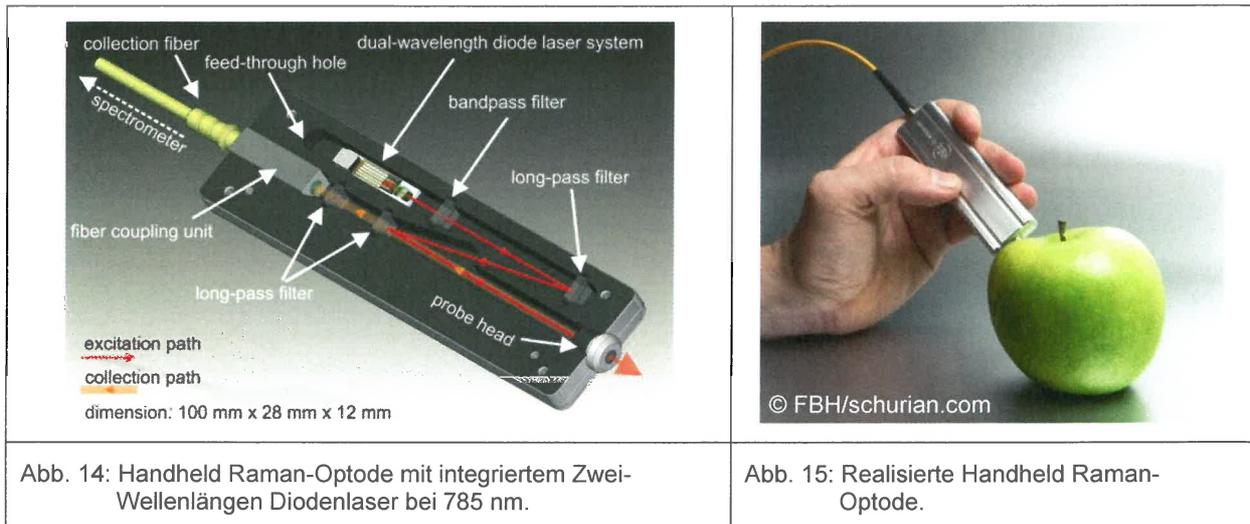
Im Projekt USER-PA wurde vom Projektpartner The Agricultural University of Athens eine Plattform für ein ort aufgelöstes Farmmanagement (FMIS) realisiert. Um auch Raman-Messergebnisse auf einer zukünftigen Messplattform ortsaufgelöst für die Präzisionslandwirtschaft bereitzustellen, wurde dem Projektpartnern aus Athen die Datenstruktur und Beispielspektren aus Raman-Messungen zur Integration der Messtechnik in die FMIS Plattform bereitgestellt.

**Die Arbeiten in diesem Arbeitspaket erfolgten entsprechend der ursprünglichen Planung.**

## 12. Weitere Optimierung des Messsystems

(Q10)

Basierend auf den in Abbildung 4 und 12 gezeigten Aufbauten einer portablen Raman-Optode wurde ein Konzept zur Miniaturisierung und Realisierung einer Handheld Raman-Optode für einen Feldeinsatz umgesetzt.



In Abbildung 14 ist eine schematische Darstellung der Handheld Raman-Optode mit einem integrierten Zwei-Wellenlängen Diodenlaser bei 785 nm aufgezeigt. Der Diodenlaser wurde für eine Integration zusammen mit einem Mikro-Peltier-Element zur Temperaturstabilisierung und –kontrolle auf eine AlN-Keramik (20 mm x 5 mm) montiert. Mikrooptiken kollimieren den Anregungsstrahl. Ein Bandpassfilter dient zur Unterdrückung der spektral außerhalb der Laserwellenlänge liegenden verstärkten spontanen Emission (amplified spontaneous emission, ASE). Über Langpassfilter die bei der Anregungswellenlänge hochreflektierend wirken wird der Laserstrahl zum Messkopf geführt und dort über eine Linse auf die zu untersuchende Probe fokussiert. Ein Quarzglasfenster befindet sich zwischen der Fokussieroptik und der Probe und schützt die inneren Komponenten. Das um 180° rückgestreute Licht wird über die gleiche Optik eingesammelt und zu zwei Langpassfiltern geführt. Hier wird sowohl das elastisch gestreute Licht als auch das Anti-Stokes gestreutem Licht reflektiert und das langwellig verschobene Stokes-Licht passiert beide Filter. Über eine Koppeleinheit wird mittels einer weiteren Linse das Raman-Licht in eine Sammelfaser eingekoppelt und zum kompakten Spektrographen aus Abbildung 5 geführt. Das Gehäuse der Handheld Raman-Optode ist aus Aluminium gefertigt und hat die Dimensionen 100 mm x 28 mm x 12 mm. Eine realisierte Optode ist in Abbildung 15 gezeigt.

**Die Arbeiten in diesem Arbeitspaket erfolgten entsprechend der ursprünglichen Planung.**

## 13. Vorbereitung und Durchführung eines gemeinsamen Feldexperiments

(Q11)

Im Jahr 2015 wurden gemeinsame Feldexperimente beim Projektpartner an der Fachhochschule Westschweiz in Changins durchgeführt. Hierbei sollten die zu untersuchenden Äpfel direkt an den Bäumen auf der Plantage gemessen werden. Um diese Messungen vor-Ort durchzuführen wurde die realisierte Handheld Raman-Optode an ein portables Messsystem angebunden. Dieses Messsystem beinhaltet das kompakte Spektrometer aus Abbildung 5, miniaturisierte Stromquellen zur Ansteuerung des integrierten

Zwei-Wellenlängen Diodenlasers und eine Temperaturregler. Eine 12 V Batterie dient zur Stromversorgung und ein USB Analog-Ausgangs-Modul zur Kommunikation und Kontrolle der elektronischen Komponenten mit einem Messrechner (Laptop). Die Komponenten wurden in einen robusten, für einen Feldeinsatz geeigneten, Koffer integriert. In Abbildung 16 ist das realisierte Gesamtsystem im Feldeinsatz in einer Apfelplantage beim Projektpartner gezeigt.



Abb. 16: Vor-Ort Raman/SERDS-Untersuchungen an Blättern und Äpfeln während gemeinsamer Feldexperimente in einer Apfelplantage in Duillier, Schweiz (Aug/Sept. 2015).

Während der Feldexperimente wurden in der Apfelplantage Äpfel und Blätter an den Bäumen vor Ort gemessen.

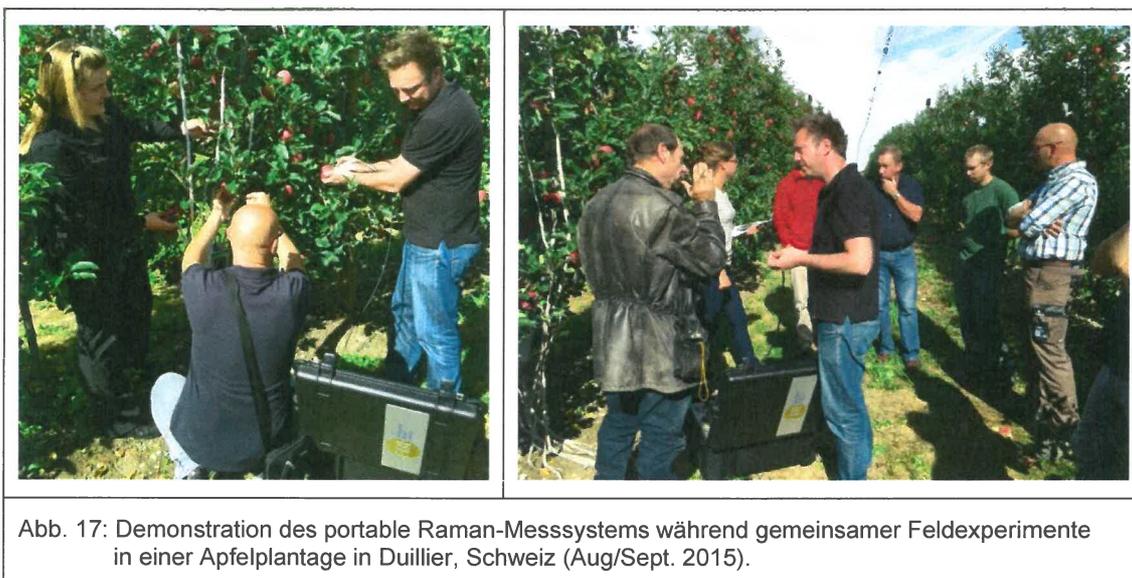


Abb. 17: Demonstration des portable Raman-Messsystems während gemeinsamer Feldexperimente in einer Apfelplantage in Duillier, Schweiz (Aug/Sept. 2015).

Während der gesamten Feldexperimente arbeitete das Raman-Messsystem stabil und einwandfrei.

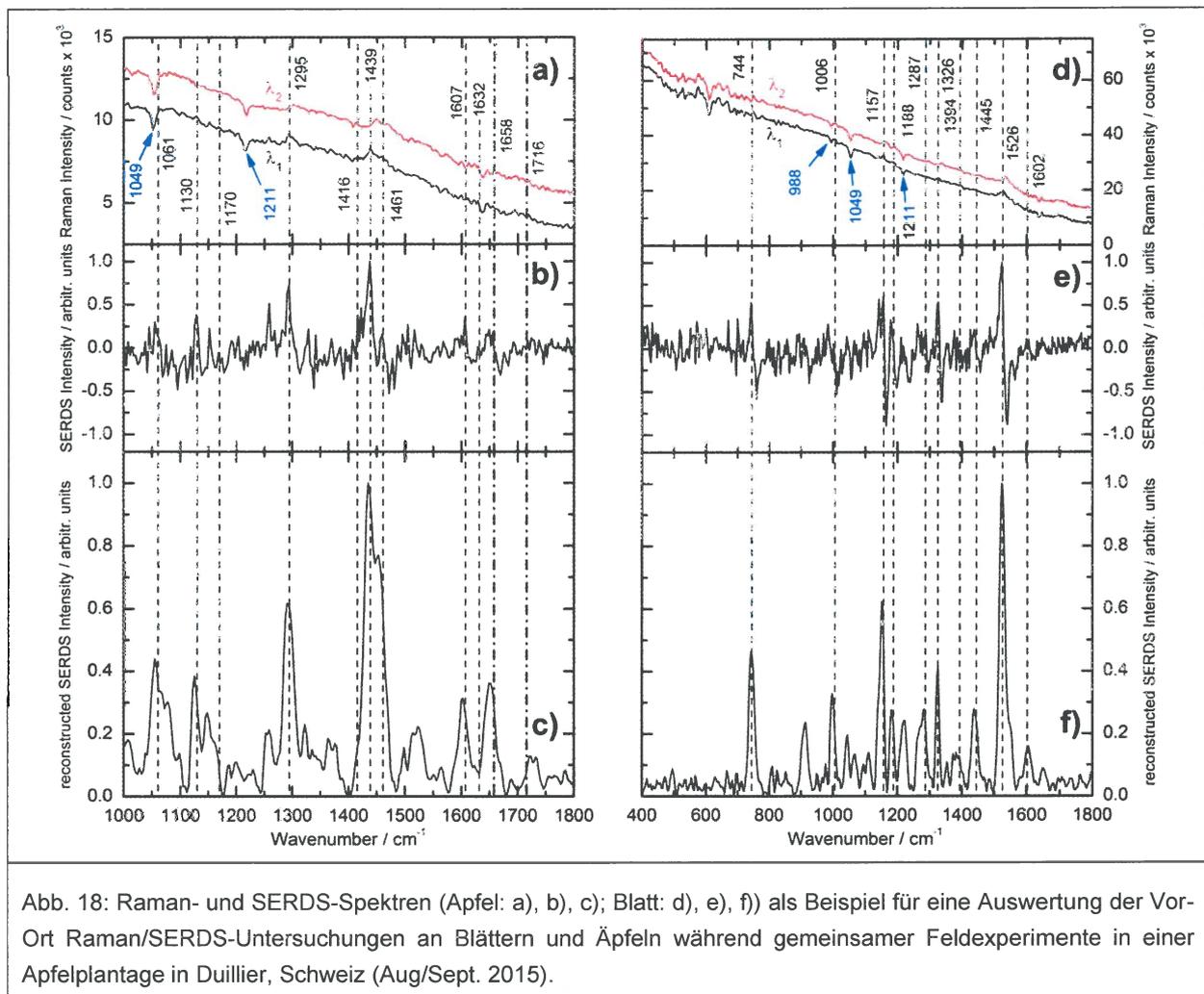
Begleitend zu den Feldexperimenten wurde das portable Raman-Messsystem lokal Interessierten aus der Agrar- und Landwirtschaft sowie einem lokalen Journalisten (Bernard Messerli, Agri, [www.agrihebdo.ch](http://www.agrihebdo.ch)) vorgestellt. Diese vor-Ort Demonstration ist in Abbildung 18 dargestellt.

**Die Arbeiten in diesem Arbeitspaket erfolgten entsprechend der ursprünglichen Planung.**

#### 14. Auswertung des Feldexperiments

(Q11-Q12)

Die während der Feldexperimente gewonnenen Messdaten wurden im Anschluss der Messkampagne ausgewertet. In Abbildung 18 sind exemplarisch Raman-Spektren von einem Apfel und einem Apfelblatt gezeigt. Die Anregungsleistung betrug 50 mW an der Probe und die Messzeit 0,2 Sekunden pro Spektrum. In Abbildung a) und d) sind die jeweiligen Raman-Spektren vom Apfel bzw. Blatt mit den Anregungswellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  gezeigt. Die Raman-Spektren beider Proben zeigen hier einen hohen Störuntergrund aus Fluoreszenzsignalen und Tageslichtsignalen und erschweren eine qualitative Auswertung der Messungen.



In Abbildung 18 b) und e) sind die dazugehörigen SERDS-Spektren und in Abbildung 18 c) und f) die jeweiligen rekonstruierten SERDS-Spektren. Die Ergebnisse zeigen hier deutlich dass sich mit Hilfe von der Messmethode SERDS die Raman-Signale von den Störsignalen effizient trennen lassen.

Erstmals konnte mit den gezeigten Feldmessungen der vor-Ort Einsatz der Messmethode SERDS unter Tageslichtbedingungen demonstriert werden.

**Die Arbeiten in diesem Arbeitspaket erfolgten entsprechend der ursprünglichen Planung.**

**15. Bisherige Ergebnisse wurden in referierte Zeitschriften, auf internationalen Konferenzen und weiteren Medien veröffentlicht:**

**Referierte Fachartikel**

- B. Sumpf, J. Fricke, M. Maiwald, A. Müller, P. Ressel, F. Bugge, G. Erbert and G. Tränkle, "Wavelength stabilized 785 nm DBR-ridge waveguide lasers with an output power of up to 215 mW", *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 045025 (2014).
- M Maiwald, A. Müller, B. Sumpf, G. Erbert, G. Tränkle, " Capability of shifted excitation Raman difference spectroscopy under ambient daylight", *Appl. Opt.*, vol 54, no. 17, pp. 5520-5524 (2015).
- M. Maiwald, A. Müller, B. Sumpf, G. Tränkle, "A portable shifted excitation Raman difference spectroscopy system: device and field demonstration", *J. Raman Spectrosc.*, published online (2016).

**Konferenzbeitrag**

- M. Maiwald, A. Müller, J. Selbeck, J. Käthner, M. Zude, D. Fleury, B. Sumpf, G. Erbert, G. Tränkle, " Shifted excitation Raman difference spectroscopy: a potential tool for outdoor measurements in precision agriculture", *Proc. SPIE 9488, Sensing for Agriculture and Food Quality and Safety VII*, 94880G (2015).

**Pressebeitrag**

- Bernard Messerli, "De l'ingénierie pointue pour l'irrigation", *Agri*, hebdomadaire professionnel agricole de la Suisse romande, 18.09.2015.

Berlin, 29.07.2016



---

Priv.-Doz. Dr. Bernd Sumpf  
Projektleiter