

Kartierung der Bodenfruchtbarkeit mittels Nahbereichssensoren

Robin Gebbers, Sebastian Vogel

Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V.

Abteilung Agromechatronik

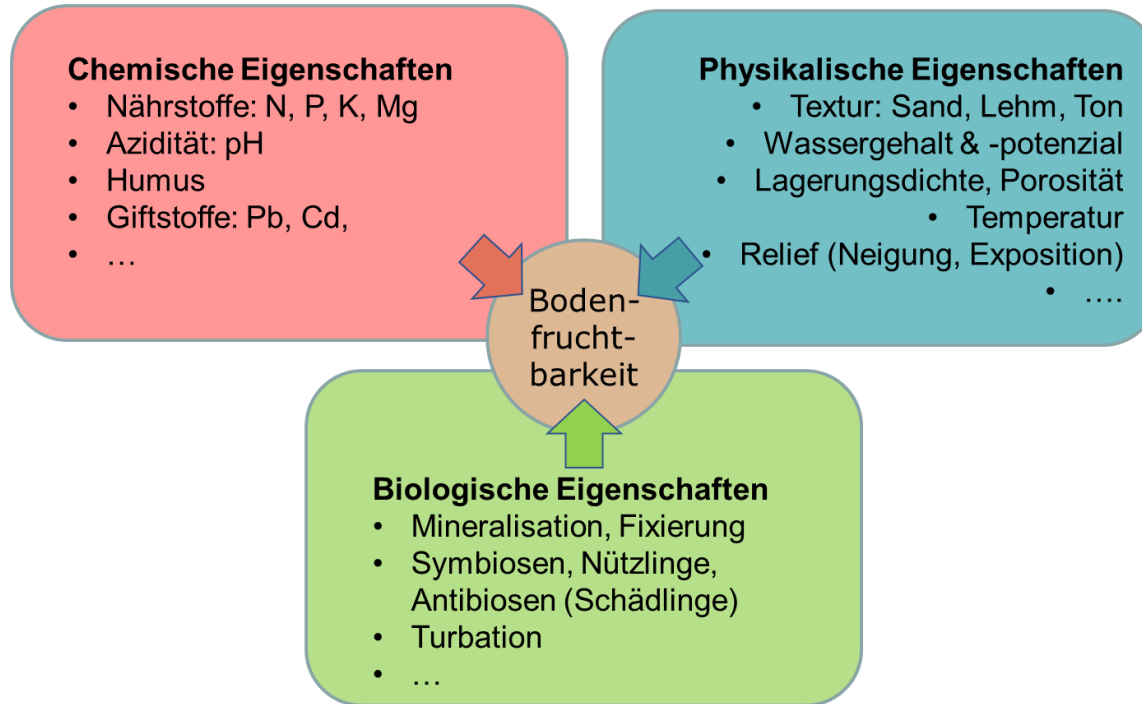
Arbeitsgruppe „Proximal Soil Sensing“

Gliederung

1. Zielgröße Bodenfruchtbarkeit
2. Warum Bodensensoren in der Landwirtschaft?
3. Überblick über Nahbereichssensoren
4. Sensorfusion durch Multisensorplattformen
5. Schlussfolgerungen

1. Zielgröße Bodenfruchtbarkeit

Komponenten der Bodenfruchtbarkeit und Zielgrößen der Bodenuntersuchung



2. Warum Bodensensoren in der Landwirtschaft?

Warum Bodensensoren in der Landwirtschaft?

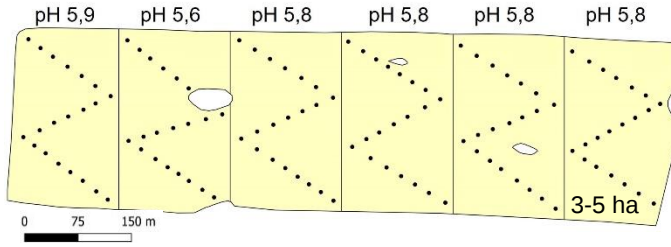
Schnelle und kostengünstige Erfassung bewirtschaftungsrelevanter Bodeneigenschaften,
insbesondere für das Nährstoffmanagement

- **Besserer Einsatz der Ressourcen**, Optimierung bezüglich Menge und Qualität der Ernteprodukte
 - **Zeitliche Anpassung** der Düngung und Bewässerung
 - **Räumliche Anpassung** (Karten für Bodenbearbeitung, Düngung, Aussaat, Ertragserwartung)
- Erfüllung gesetzlicher Auflagen
- Umweltschutz
- Neugier, fachliches Interesse

Höhere Präzision durch sensorbasierte Bodenkartierung

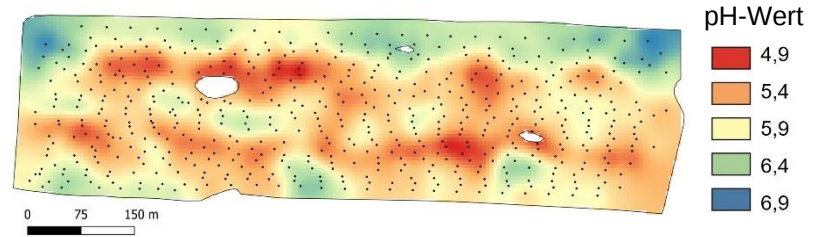
Beispiel pH-Kartierung

Klassische Mischproben



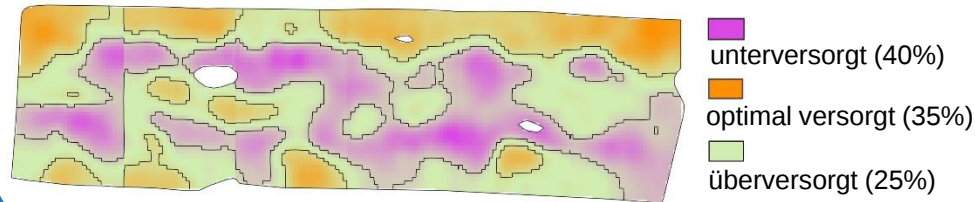
0.3 pH-Einheiten (5.6 – 5.9)

Hochauflösende Kartierung mit Sensor

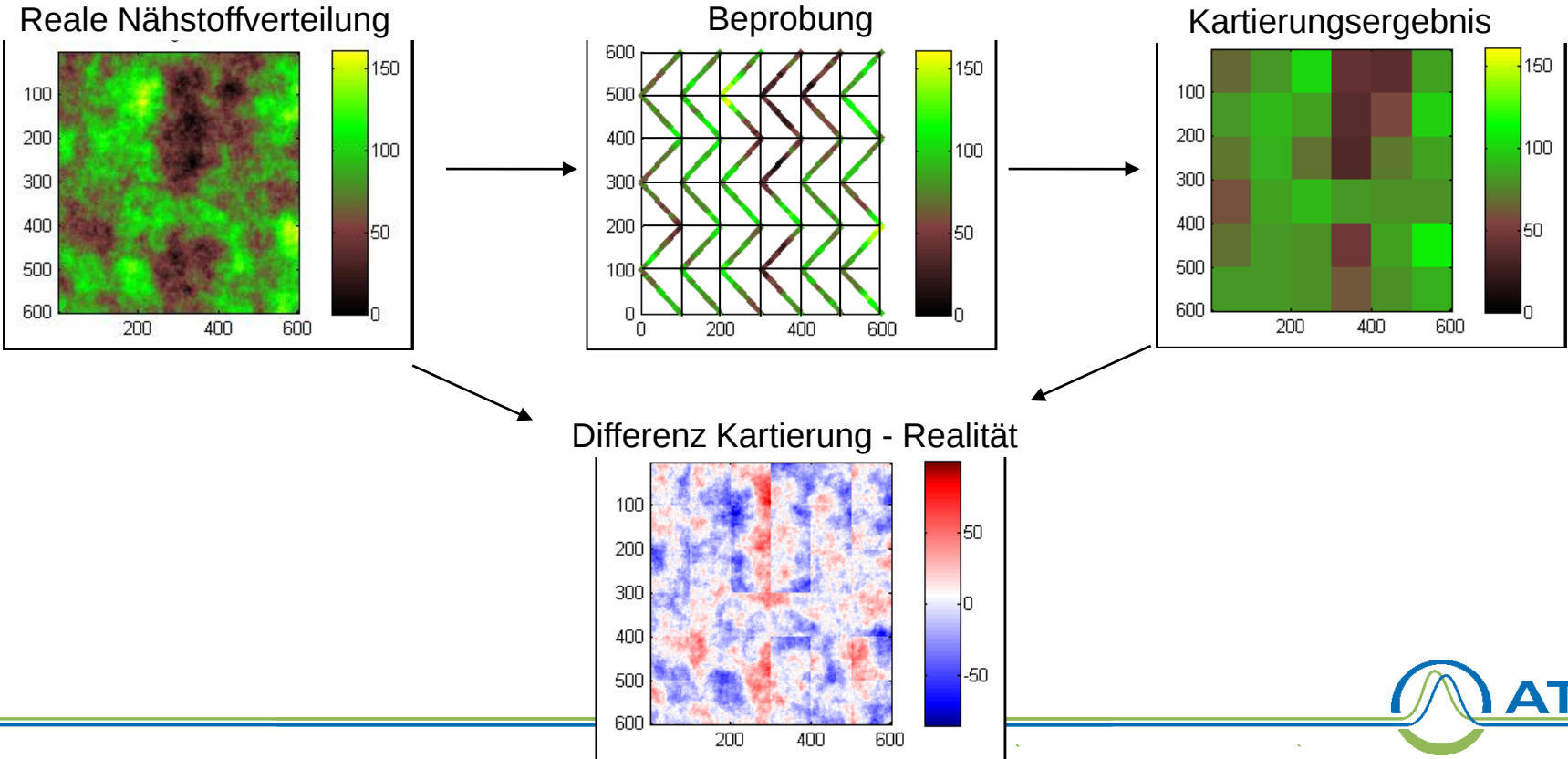


2 pH-Einheiten (4.9 – 6.9)

Suboptimale Kalkversorgung



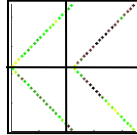
Fehleranalyse der Bodenkartierung: Simulation der Bodenkartierung



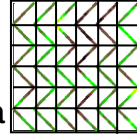
Fehleranalyse der Bodenkartierung: Sensitivitäten

Beprobungsabstand

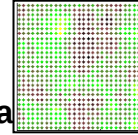
5 ha



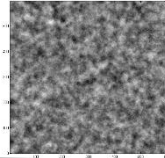
1 ha



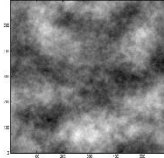
0.05 ha



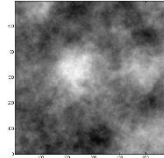
Räumliche Variabilität
(Variogramm-Reichweite
30, 60, ... , 180 m)



...

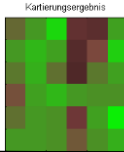


...

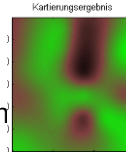


Regionalisierung

Attributierung



Interpolation



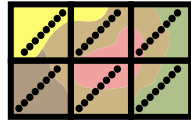
Analysefehler

0 %

4 %

20 %

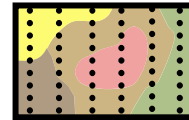
Probenahmedesign



Mischprobe diagonal



Mischprobe „Punkt“



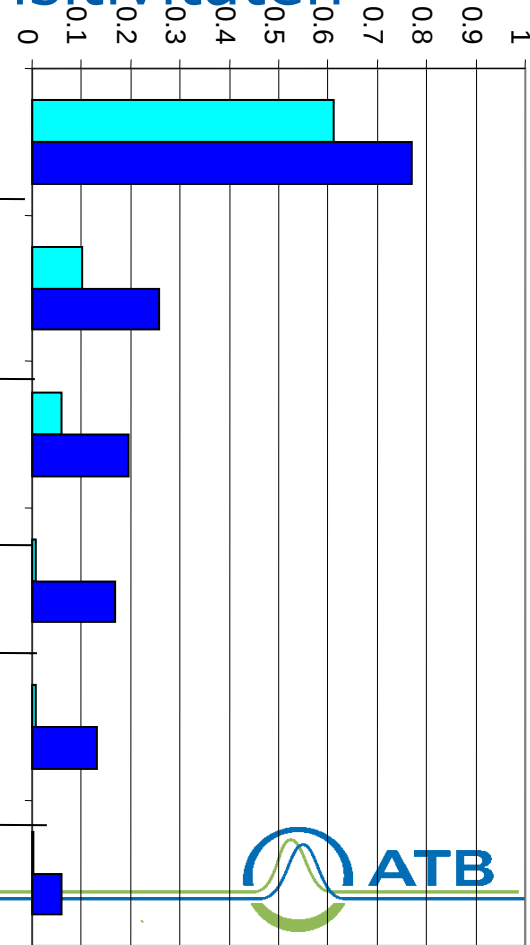
Massenbeprobung

GPS-Fehler

0 m

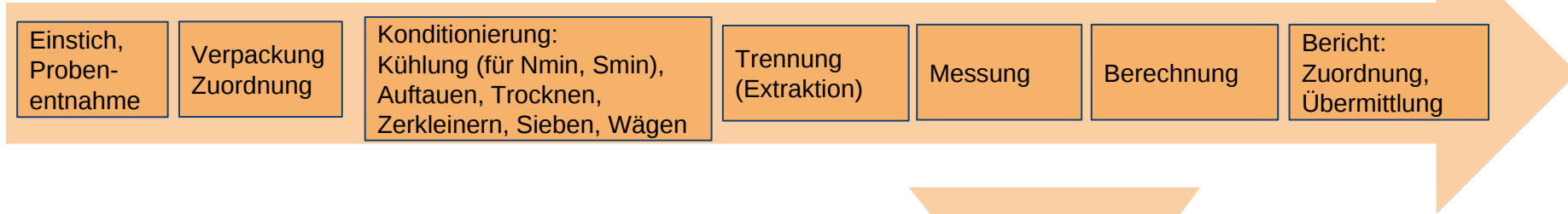


2 m

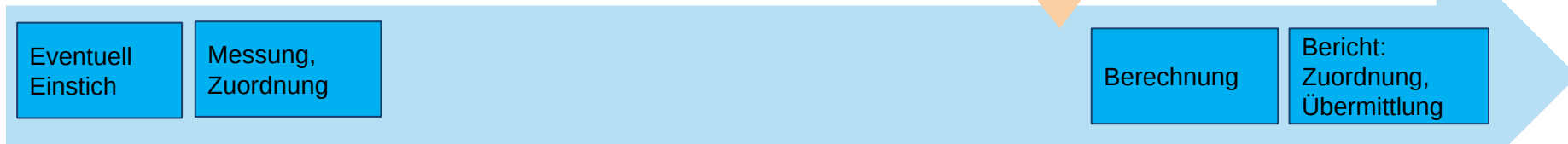


Vorteile der sensorbasierten Messung: Idealvorstellung

Konventionell (Messung *ex-situ*, im Labor)



Bodensensor (Messung *in-situ*)



Ggf. Kalibration

Typisches Vorgehen

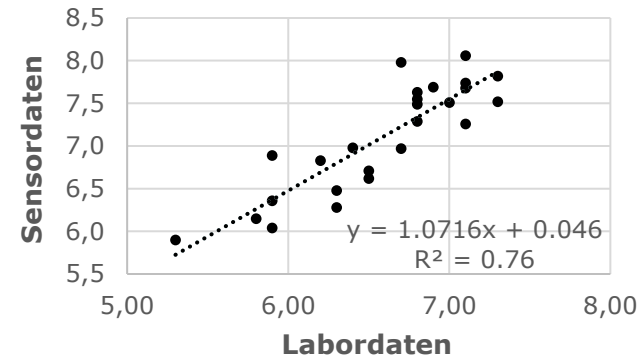
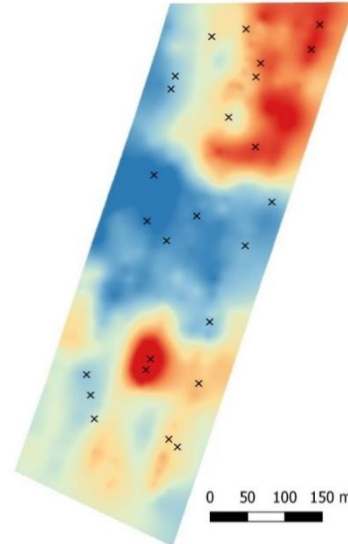
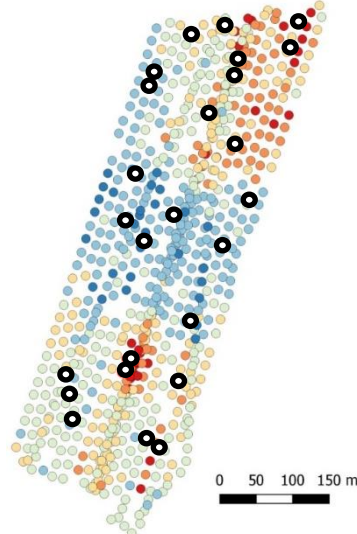
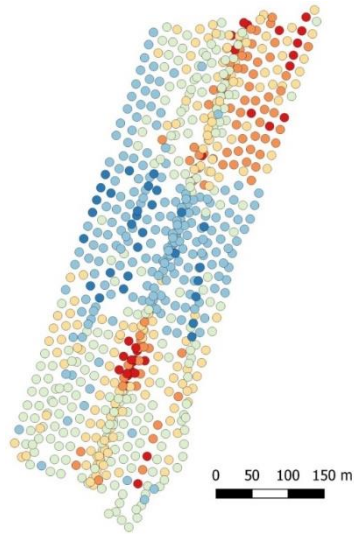
Schritt 1:
Sensorkartierung



Schritt 2:
Referenzbeprobung,
Laboranalyse



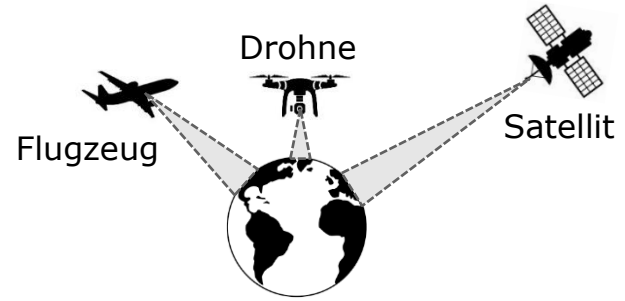
Schritt 3:
Lokale Kalibrierung,
Interpolation



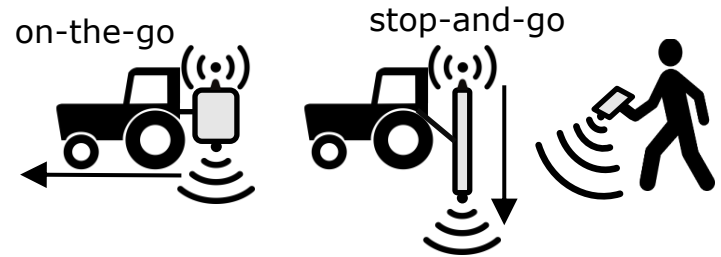
3. Überblick über Nahbereichssensoren

Lokalisation der Sensoren

- Fernerkundung, luftgestützt
(Satellit, Flugzeug, Drohne [1–100m])



- Nahbereich, bodengestützt, mobil
(on-the-go, stop-and-go)



- Nahbereich, bodengestützt, stationär
(Dauerbeobachtung im Boden)



Merkmale von sensorbasierten Verfahren

- Messprinzip
- Bezug zum Zielparameter (direkt / indirekt)
- Lokalisation der Sensoren
- Geometrie der erfassten Probe & Probenkonditionierung
- Zeitliches Antwortverhalten:
 - Messung schnelle / langsam;
 - Datennachbereitung)
- Praxistauglichkeit:
 - Nutzerfreundlichkeit,
 - Robustheit, Energiebedarf,
 - Wirtschaftlichkeit,
 - Anerkennung (administrative, fachlich)



Messprinzipien

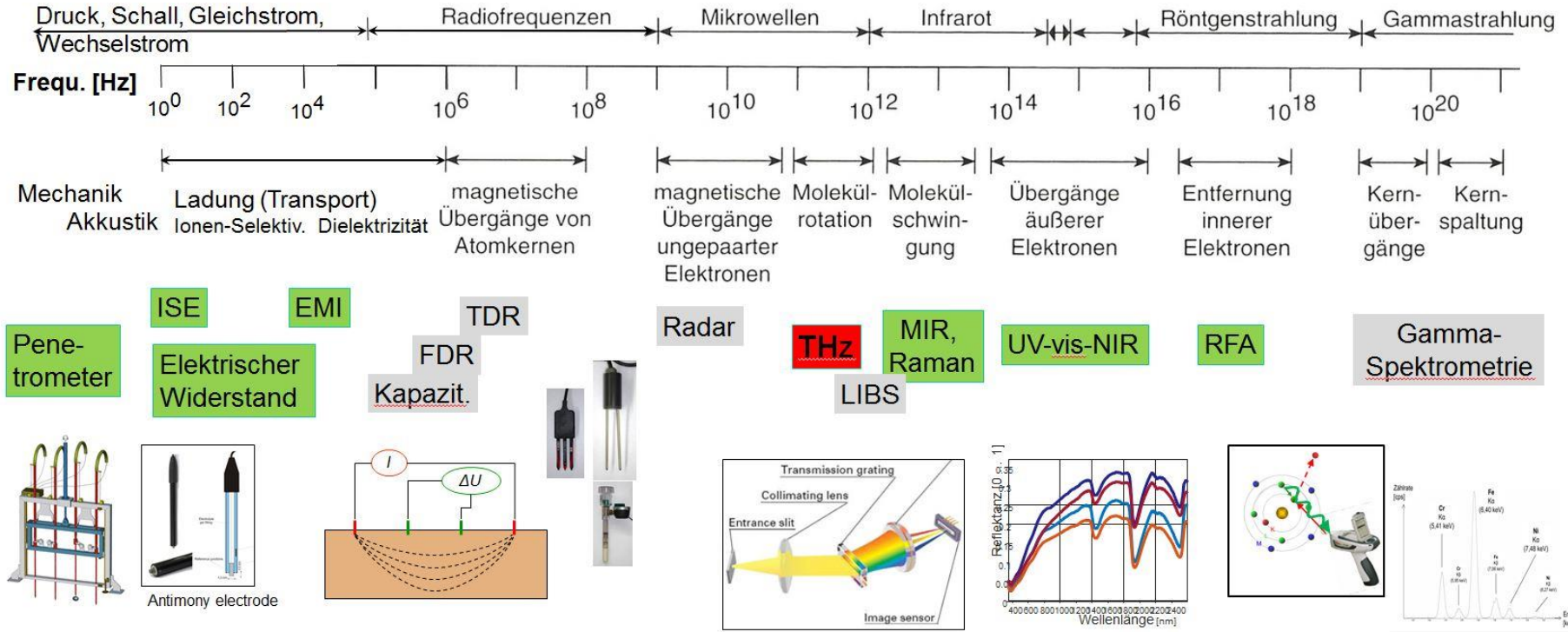
● Physikalisch

- Elektromagnetik: elektrisch, optisch, ionisierend
- Mechanisch
- Akustisch
- Thermal

● Chemisch + biologisch (Schlüssel-Schloss-Prinzip)

- Kolorimetrisch
- Ionenselektiv: ISE, ISFET, ...
- Sorption (Gase)
- Biochemische & biologisch Mechanismen: Antikörper, DNA/RNA, Enzyme, Zellen & Gewebe, Aptamere ...

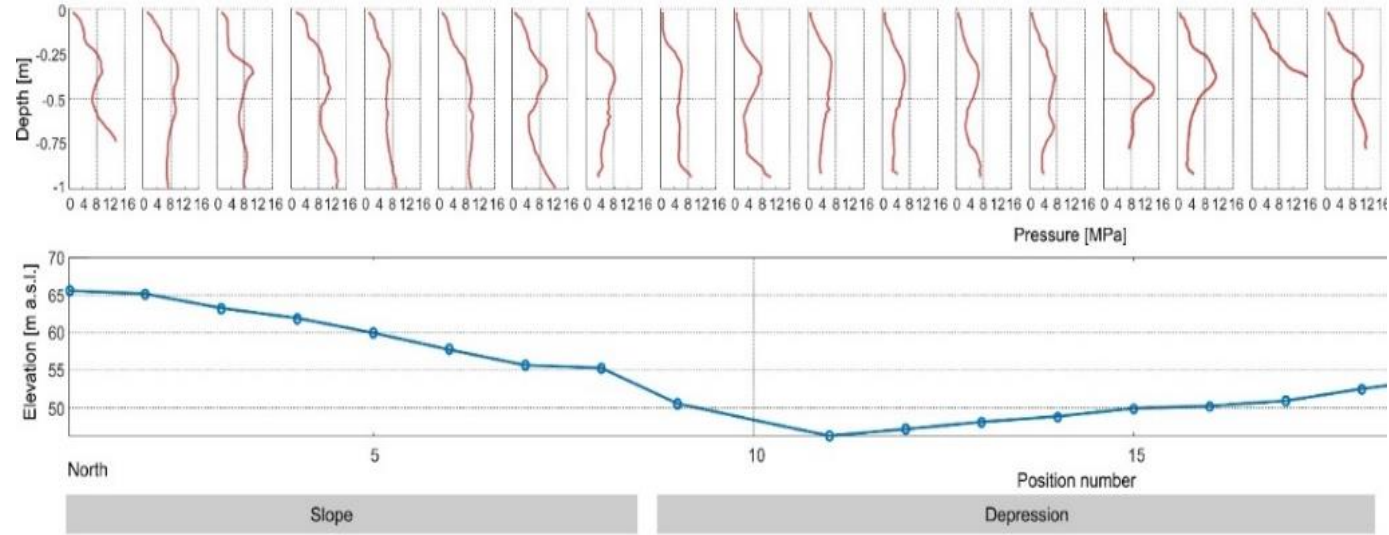
Messprinzipien



Mechanische Sensoren

Penetrometer: Durchdringungswiderstand

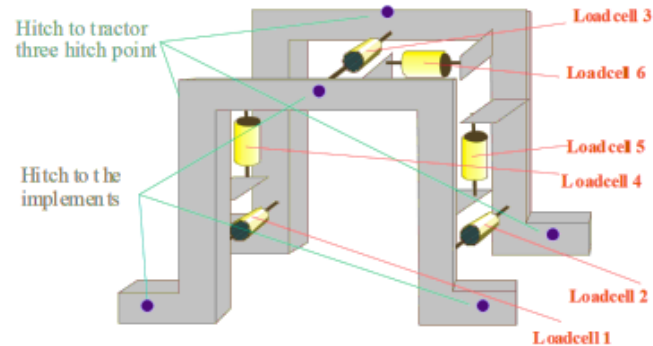
Penetrometer: Lagerungsdichte, Texturwechsel (Veris P4000)



<https://veristech.com/>

Zugkraft

Zugkraftsensoren: Lagerungsdichte, Texturwechsel



Elektrische Sensoren

Geoelektrik: Ladungstransport im Boden

GCR

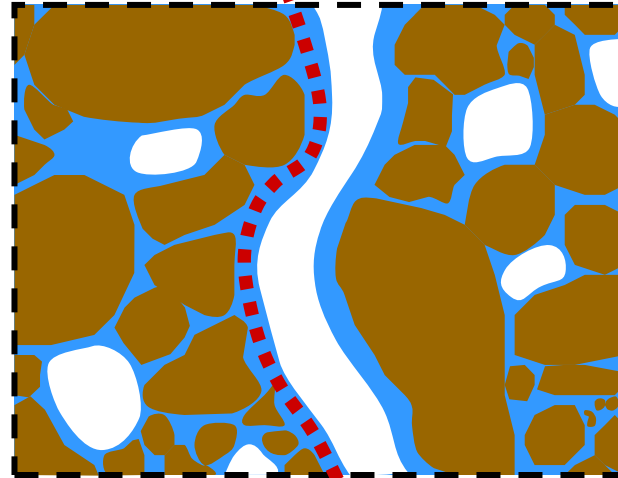


EMI



Gebbers et al. 2009

Wässrige Phase, Grenzflächen:
elektrolytische Leitung, Polarisation



Wasser



Festsubstanz



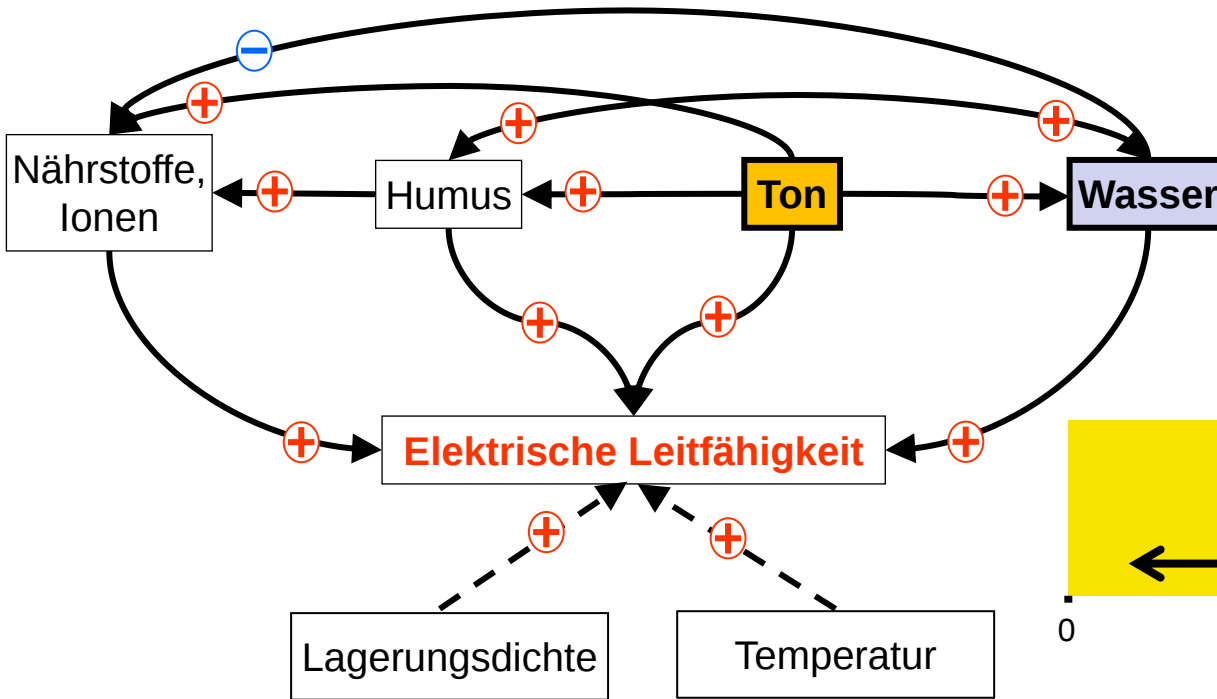
Luft

$$\frac{mS}{m} = \frac{1}{\Omega \cdot m}$$

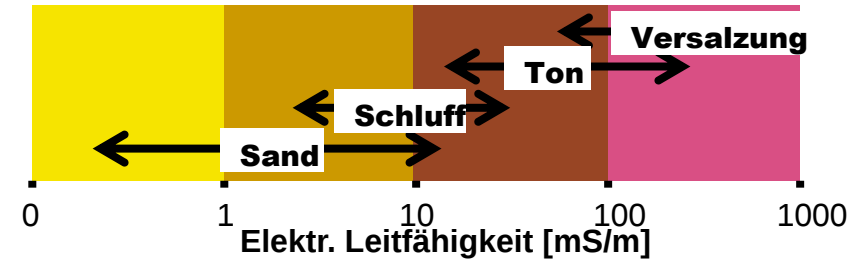
Leitfähigkeit:
 $mS \cdot m^{-1}$
(S = Siemens)

Widerstand:
 $\Omega \cdot m$

Geoelektrik: Summenparameter für Textur, Wassergehalt, Ionen ...

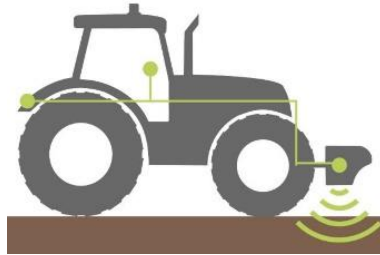


Indirekte Methode!



Geoelektrik

● TopsoilMapper (Geoprospectors): Elektromagnetische Induktion

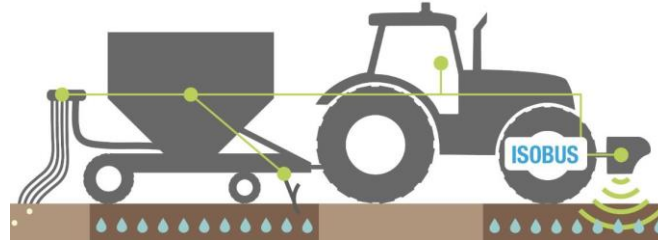


- Berührungslose ECa-Messung durch elektromagnetische Induktion in 4 kumulierten Tiefen (1 Sendespule, 4 Empfangsspulen)
- Verrechnung der ECa-Daten in relative Bodenfeuchte, Tiefe zu einer Grenzfläche, Boden(texture)zonen

- Echtzeitsteuerung (on-the-fly) der Bearbeitungstiefe (Tiefe zu Grenzfläche)



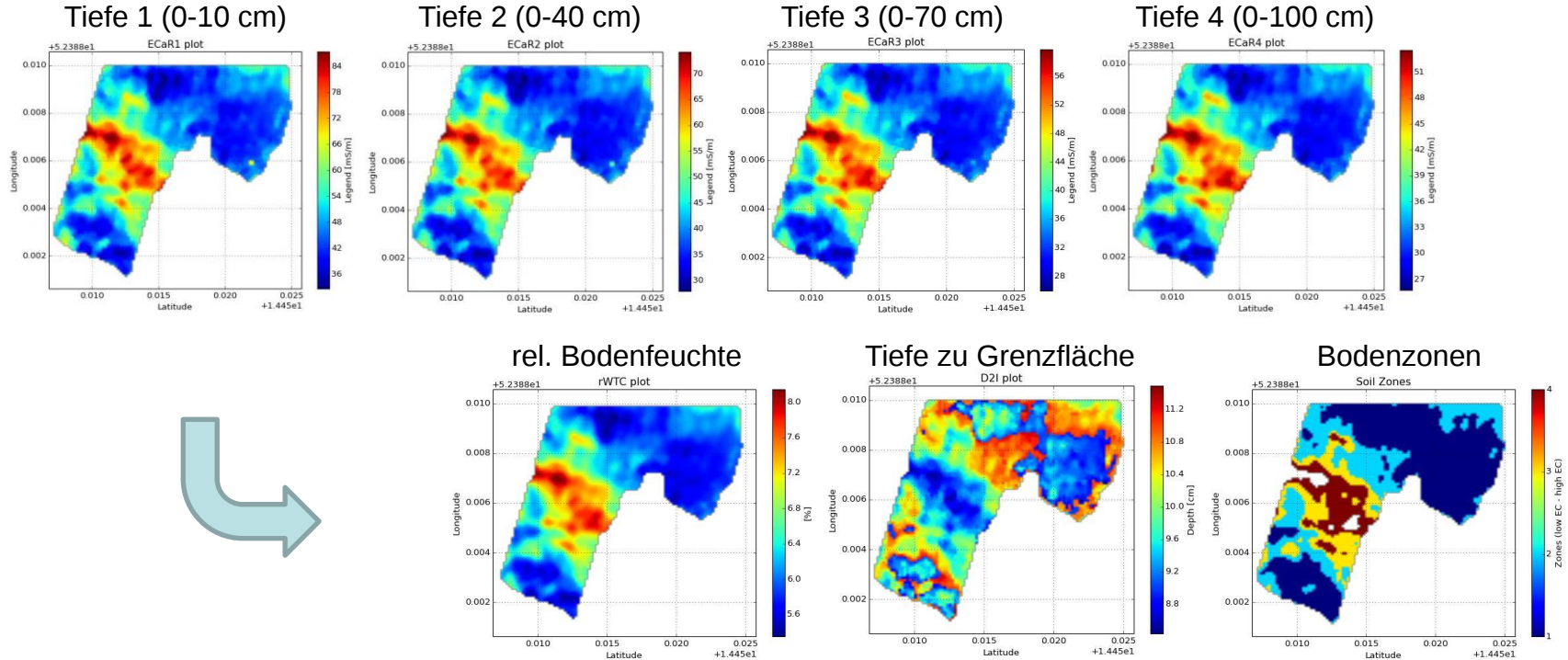
- Echtzeitsteuerung von Aussaatmaschinen (Aussaatmenge an Bodenart und/oder Bodenfeuchte angepasst)



<http://www.geoprospectors.com>

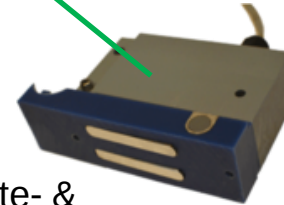
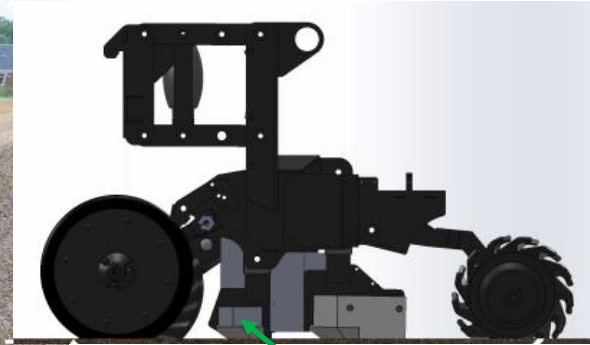
Geoelektrik

TopsoilMapper (Geoprospectors): Ableitungen aus 4 Messtiefen



Geoelektrik

- Bodenfeuchtesensor für on-the-go-Mapping (Veris iScan)

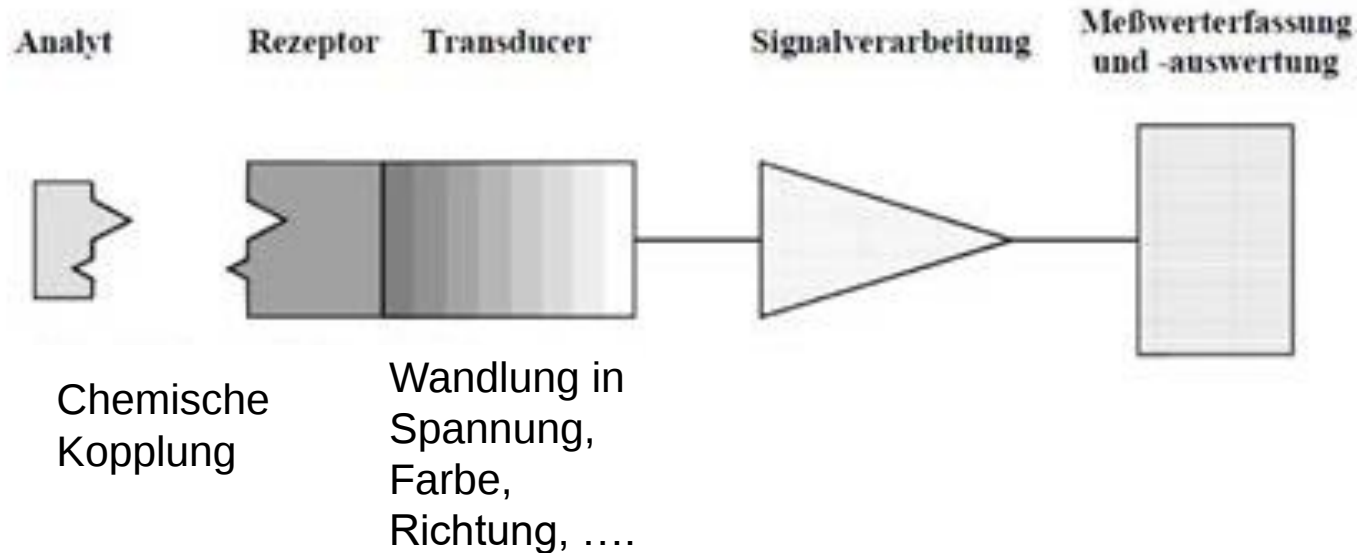


Feuchte- &
Temperaturmodul

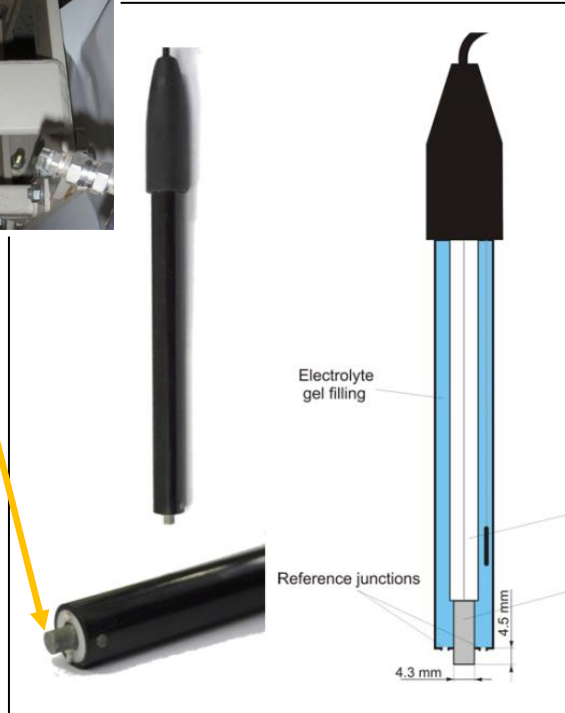
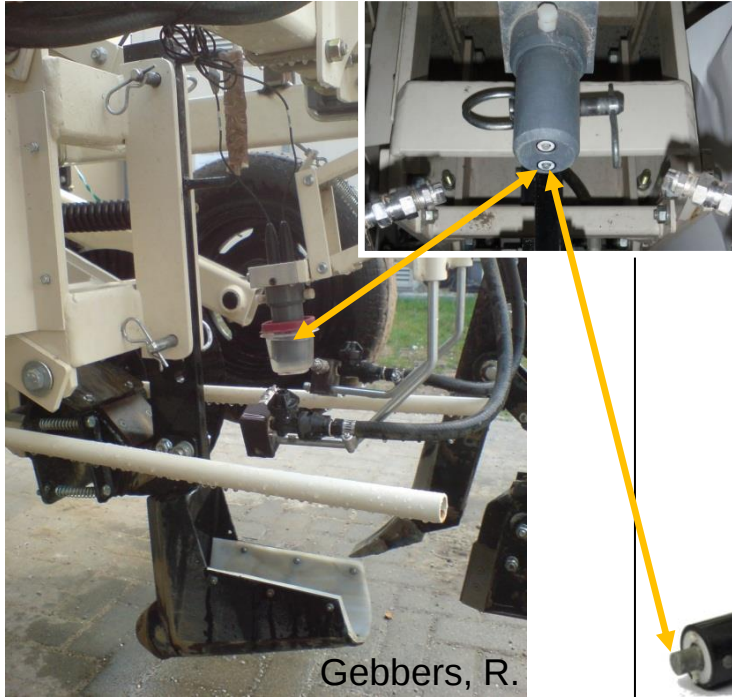
Chemische Sensoren

Grundprinzip chemischer und biologischer Sensoren

- Umwandlung chemischer Information (Struktur, Konzentration) in elektrisches Signal



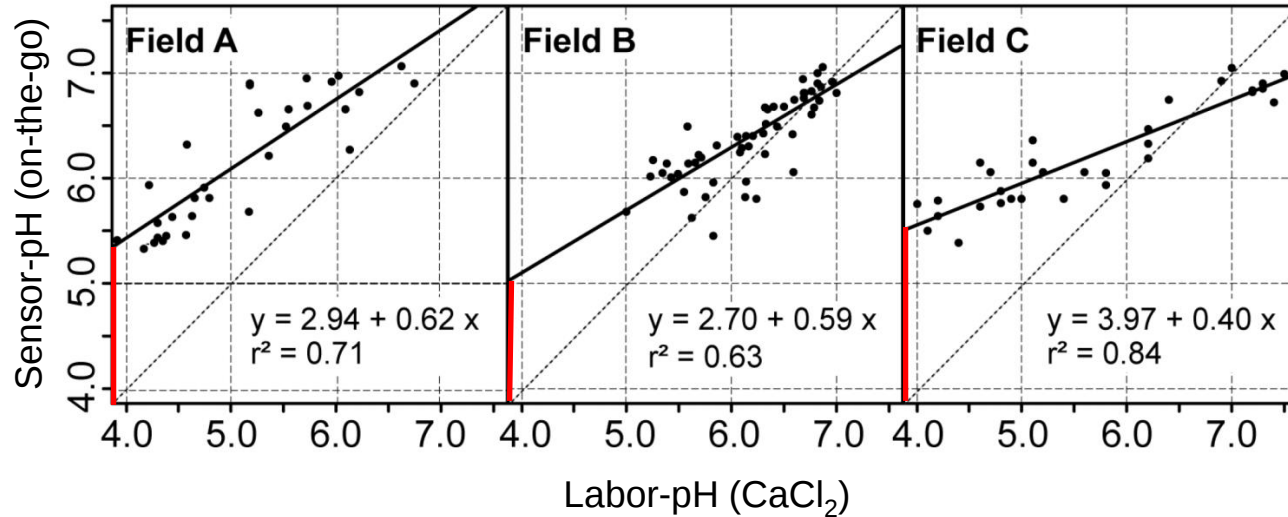
Ionenselektive Elektroden (ISE): Antimon-pH-ISE



- Metall (Antimon) als Messelektrode → sehr robust für den Feldeinsatz
- misst direkt am Boden → keine wässrige Lösung nötig

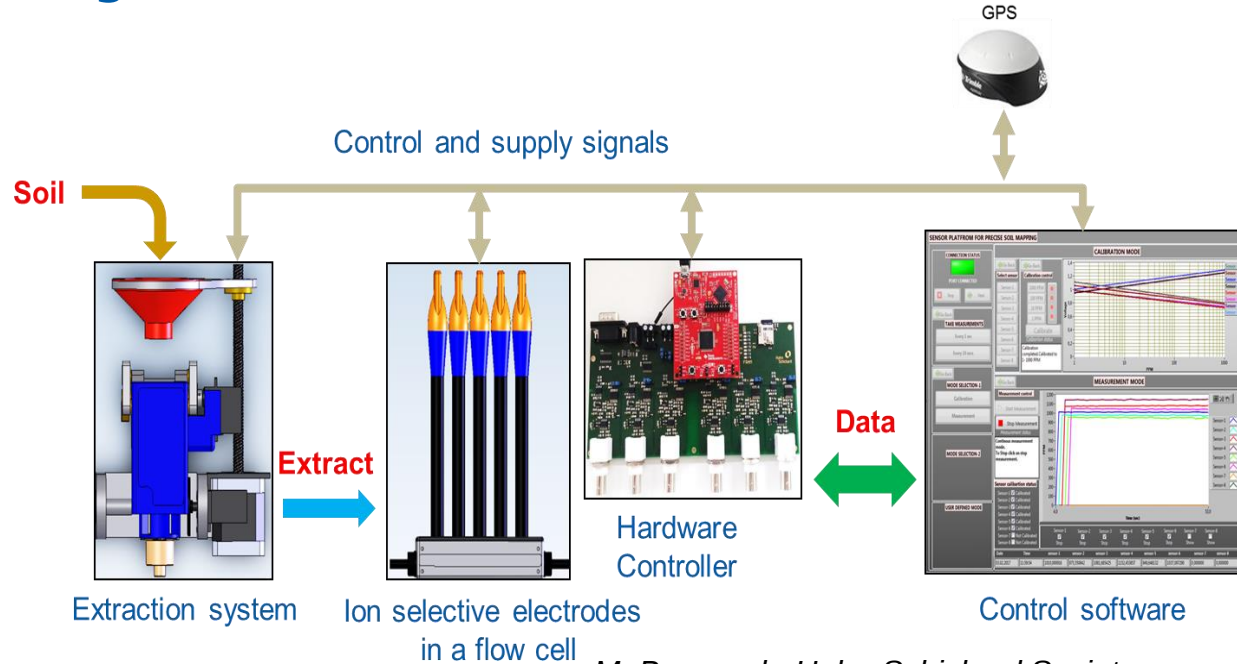
Direktes Verfahren!

Ionenselektive Elektroden (ISE): Antimon-pH-ISE



- Gute Korrelationen zwischen Sensor- und Labor-pH-Werten
- Korrelationsmodelle unterscheiden sich von Feld zu Feld → feldspezifische Kalibration nötig

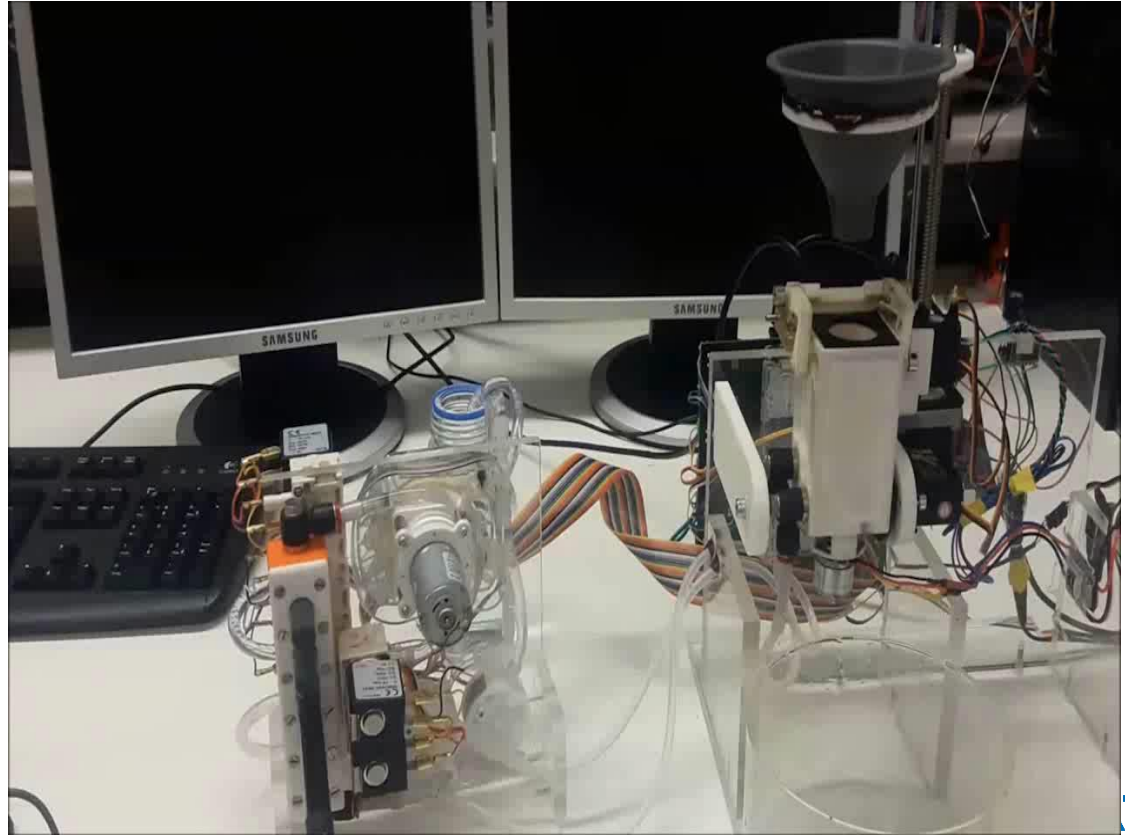
Inonenslektive Elektroden (ISE) für NO_3^- , NH_4^+ , und K^+ Automatisierung



M. Bourouah, Hahn-Schickard Society

Inonenslektive Elektroden (ISE) für NO_3^- , NH_4^+ , und K^+

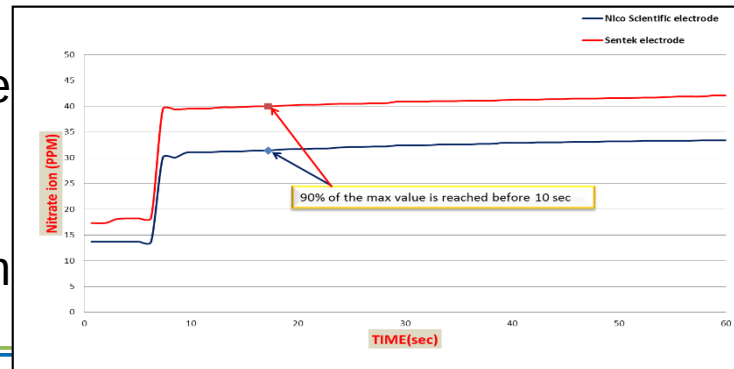
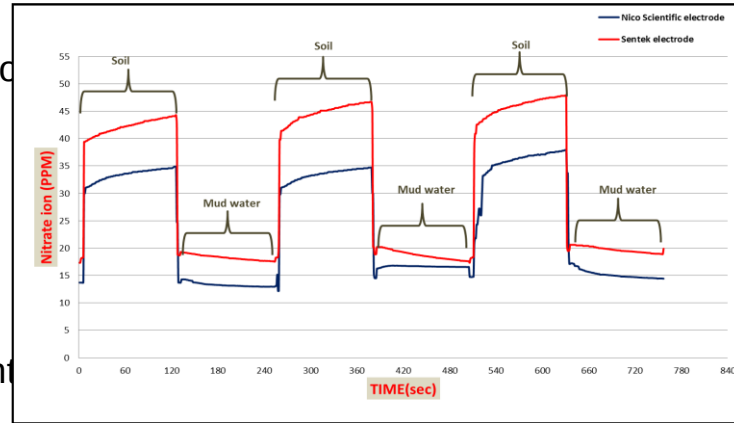
Automatisierung



Ion-selective electrodes (ISE)

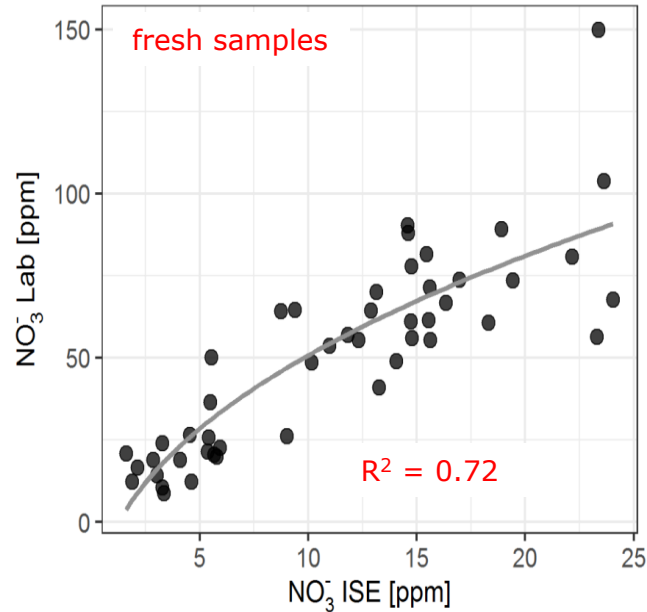
Automated system

- Sensor output stabilizes after 40 to 50 seconds
- Rise time is about 10 seconds → reasonable prediction of sensor behavior
- The sensors show good reproducibility of the measurement
- Low sensor deviation during periodically measurements:
 - Below 2 ppm for nitrate
 - below 1 ppm for potassium
 - 0,5 ppm for ammonium



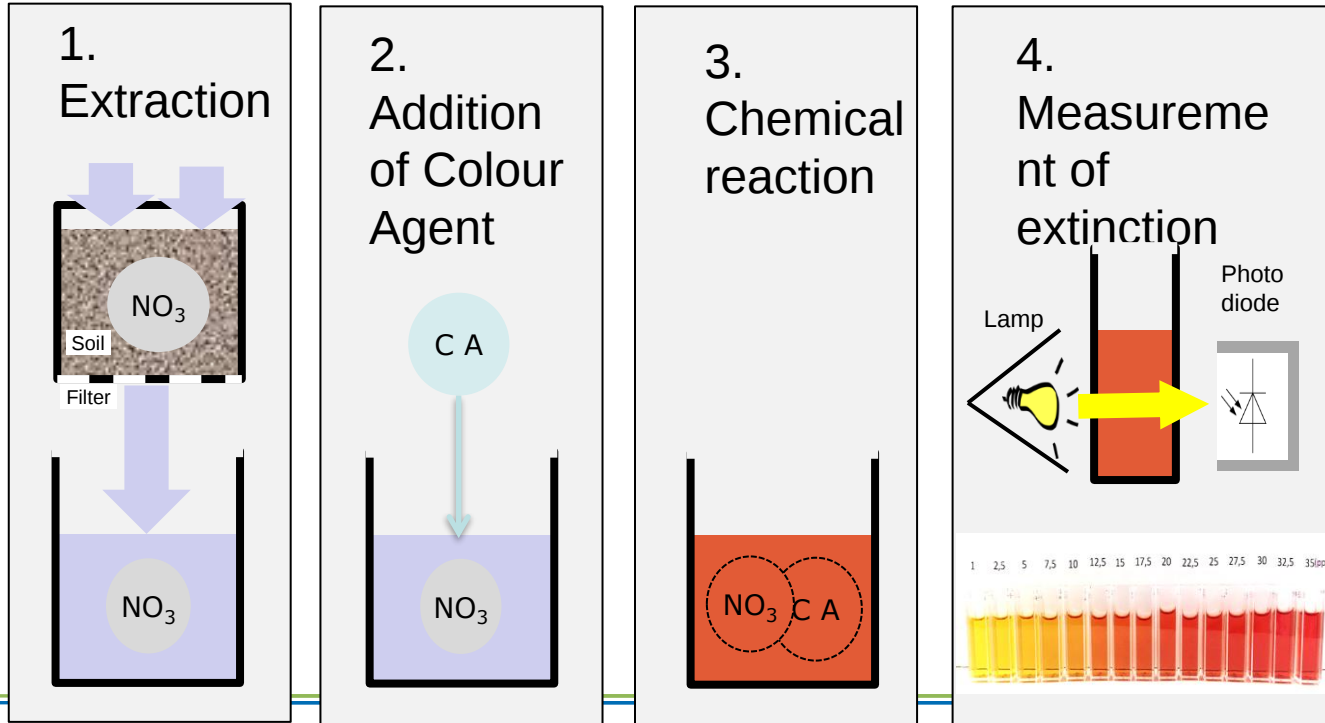
Ion-selective electrodes (ISE)

Results for NO_3^-



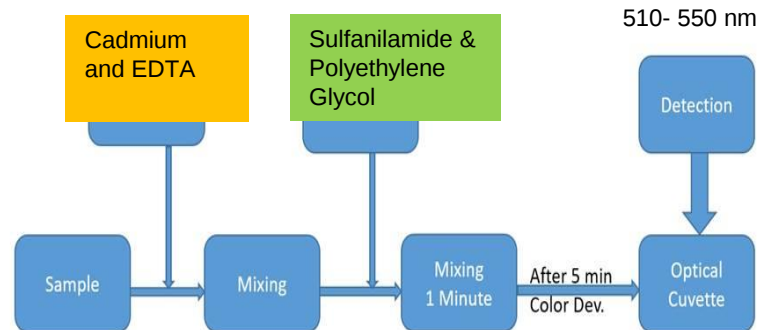
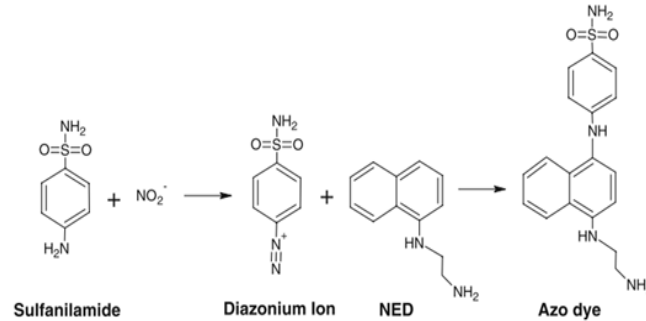
Colorimetric analysis: Principle

Colorimetric analysis determines the concentration of a chemical in a solution with the aid of a colour reagent. The extinction at a certain wavelength is a function of the concentration of the analyte



Colorimetric analysis: Cadmium reduction method for NO_3^-

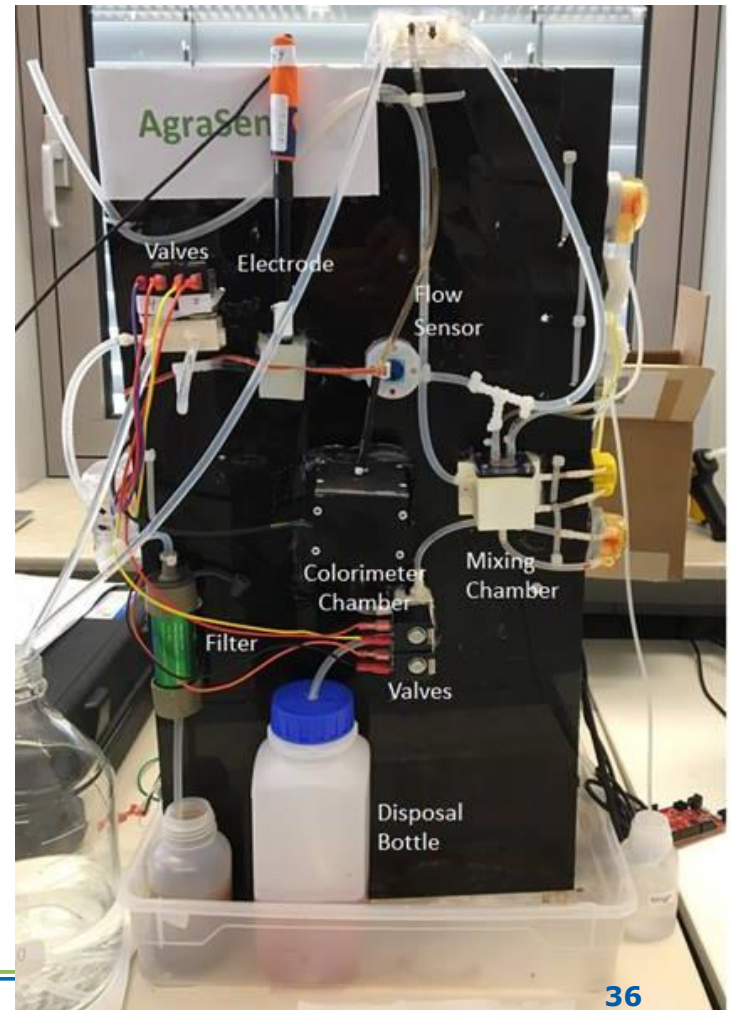
- Cadmium reduction method procedure:
- Nitrate is reduced quantitatively to nitrite by cadmium (EDTA eliminates interference).
- Nitrite diazotizing with Sulfanilamide and with Polyethylene glycol to form a highly coloured azo dye
- Colorimetry at 510 to 55 nm
- Advantages:
- Applicable for a wide range of NO_3^- concentrations,
- Relatively fast reaction,
- Long stability



Colorimetric analysis: Cadmium reduction method system for NO_3^-



*M. Bourouah,
Hahn-Schickard Society*

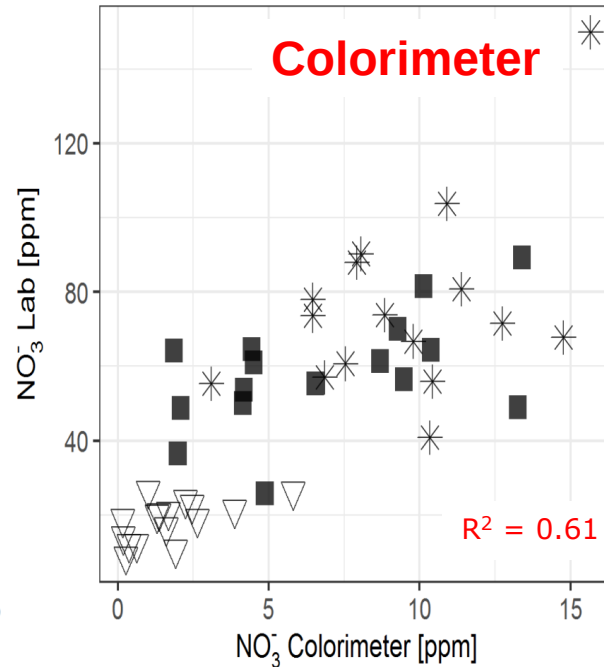
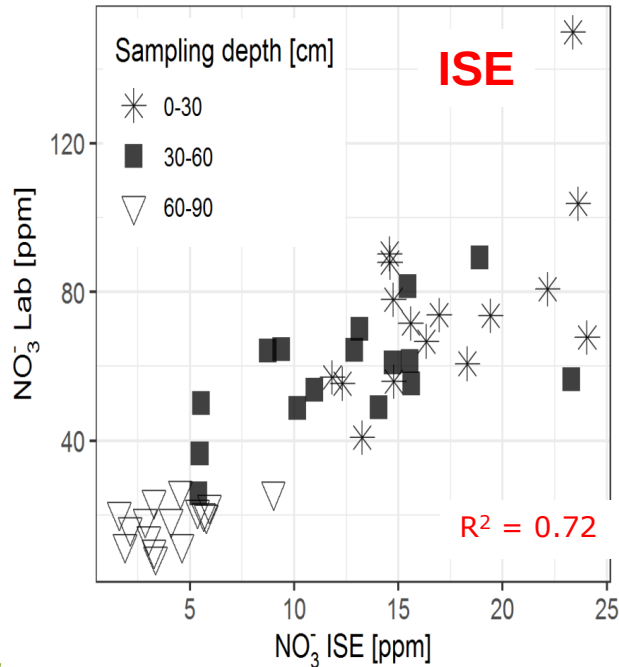


NO₃ sensing: Comparison of ISE and colorimetry

Sandy soil, Northeast Germany

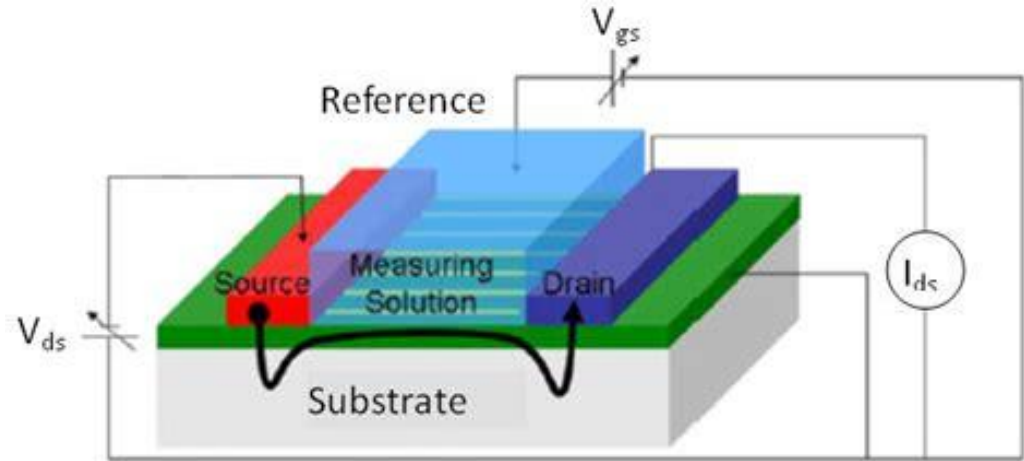
4 levels of nitrogen fertilisation, 4 repetitions each

sampling date 23.02.18



Ionenselektive Feldeffek-Transistoren ISFET

- Halbleitertechnik
- Kostengünstige Massenproduktion
- Selektive Membranen für verschiedene Ionen vorhanden (PO4 ...)
- Mechanisch Empfindlich
- Drift



Ionenselektive Feldeffek-Transistoren ISFET

Projekt soil2data

Extraktionsmitteltyp nach VDLUFA

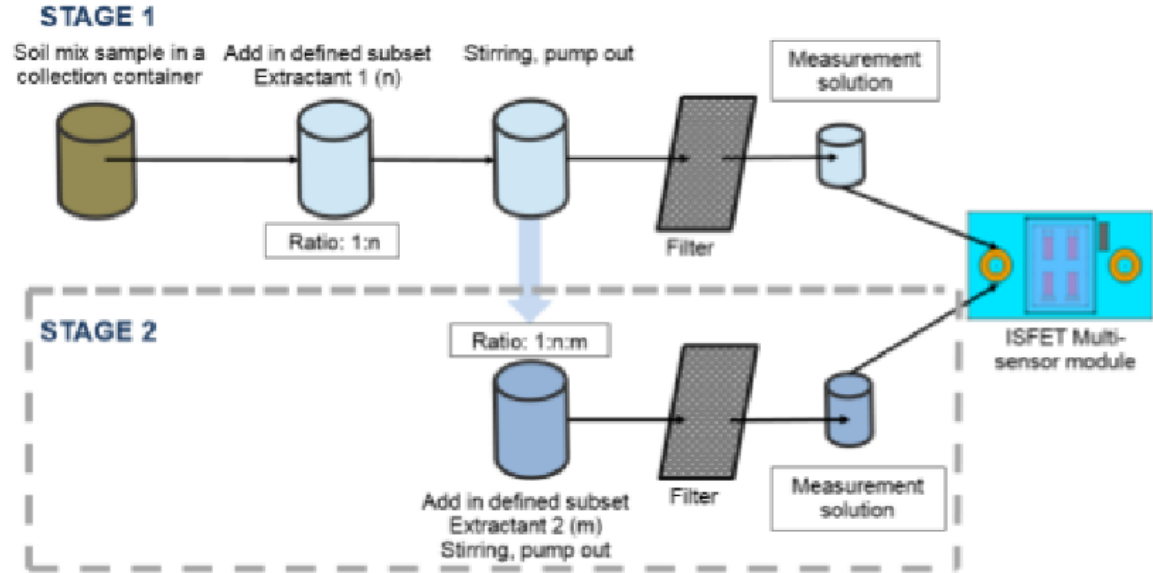
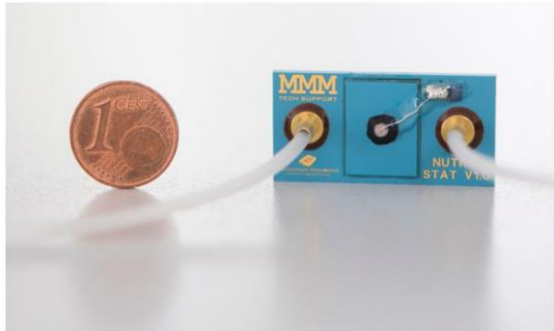
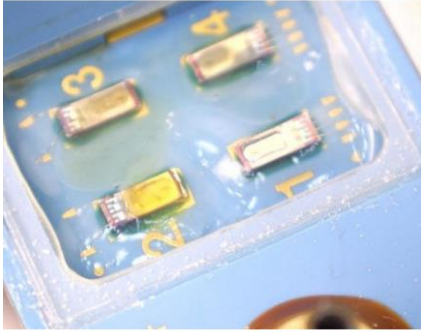
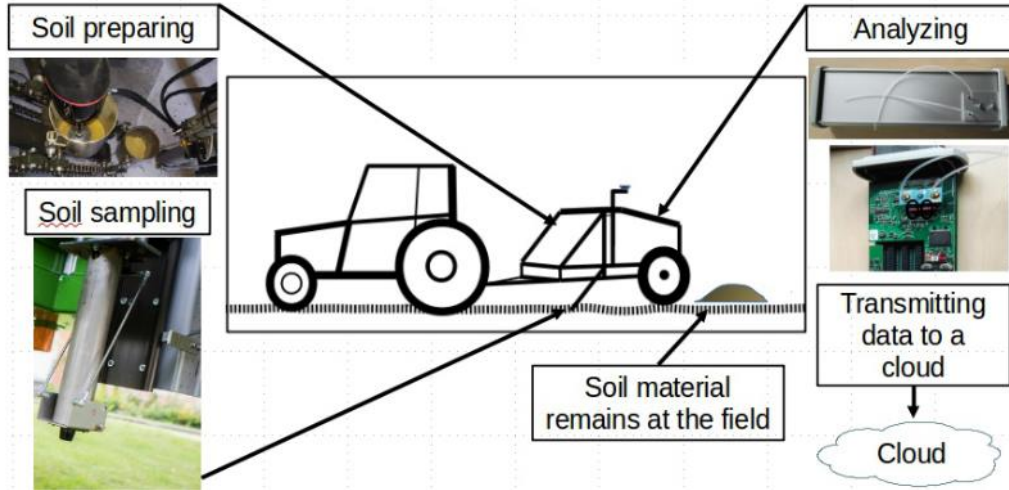


Fig. 3: "soil2data" soil preparation and nutrient extraction procedure

ISFET: soil2data Projekt



Weitere chemische und biologische Sensoren

Chemisch

- Kapillarelektrophorese

Biologisch

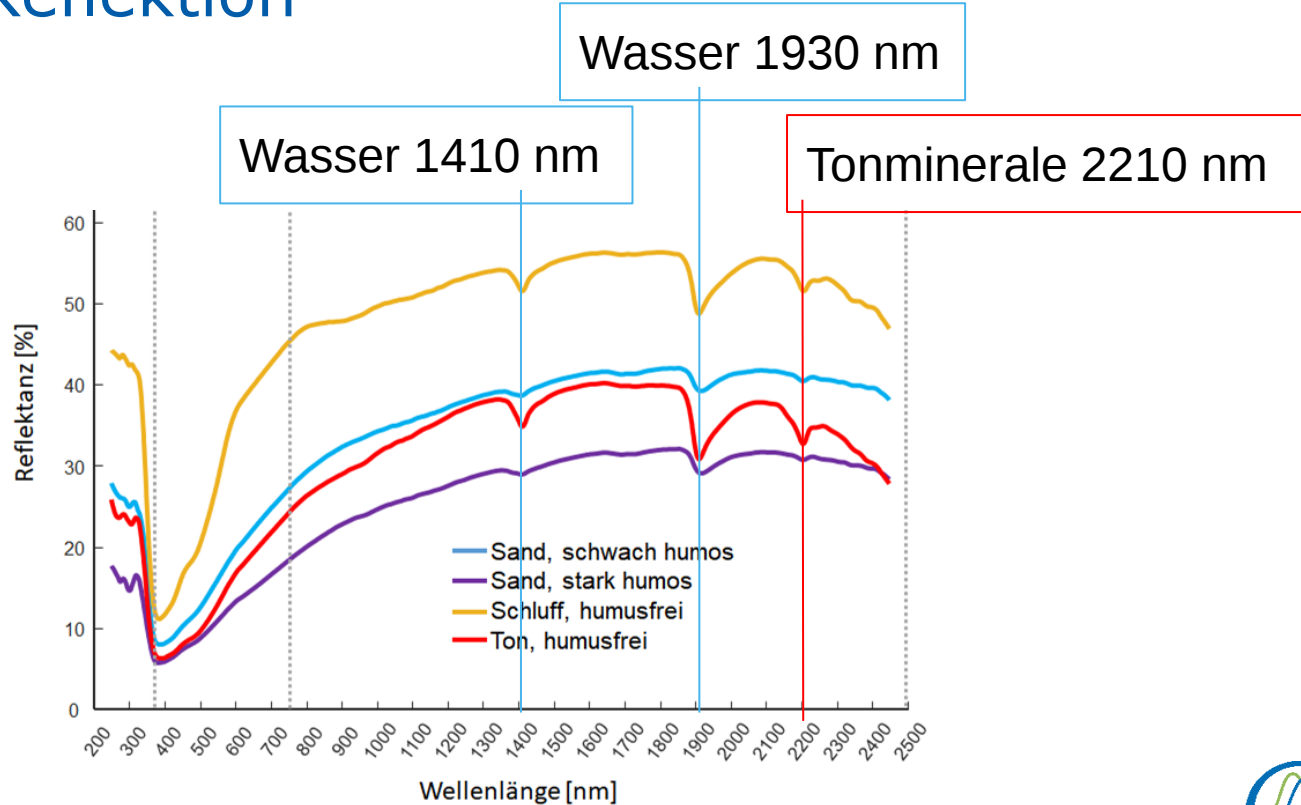
- Bioelectric Recognition Assay (BERA): Immobilisierte Zellen
- Surface Imprinted Polymer (SIP): Plastik-Antikörper
- Loop-mediated isothermal Amplification (LAMP): DNA

Alle benötigte gefilterte Extrakte aus der Bodenprobe
Probenahme, Dosierung, Mischung, Filterung, Pumpen

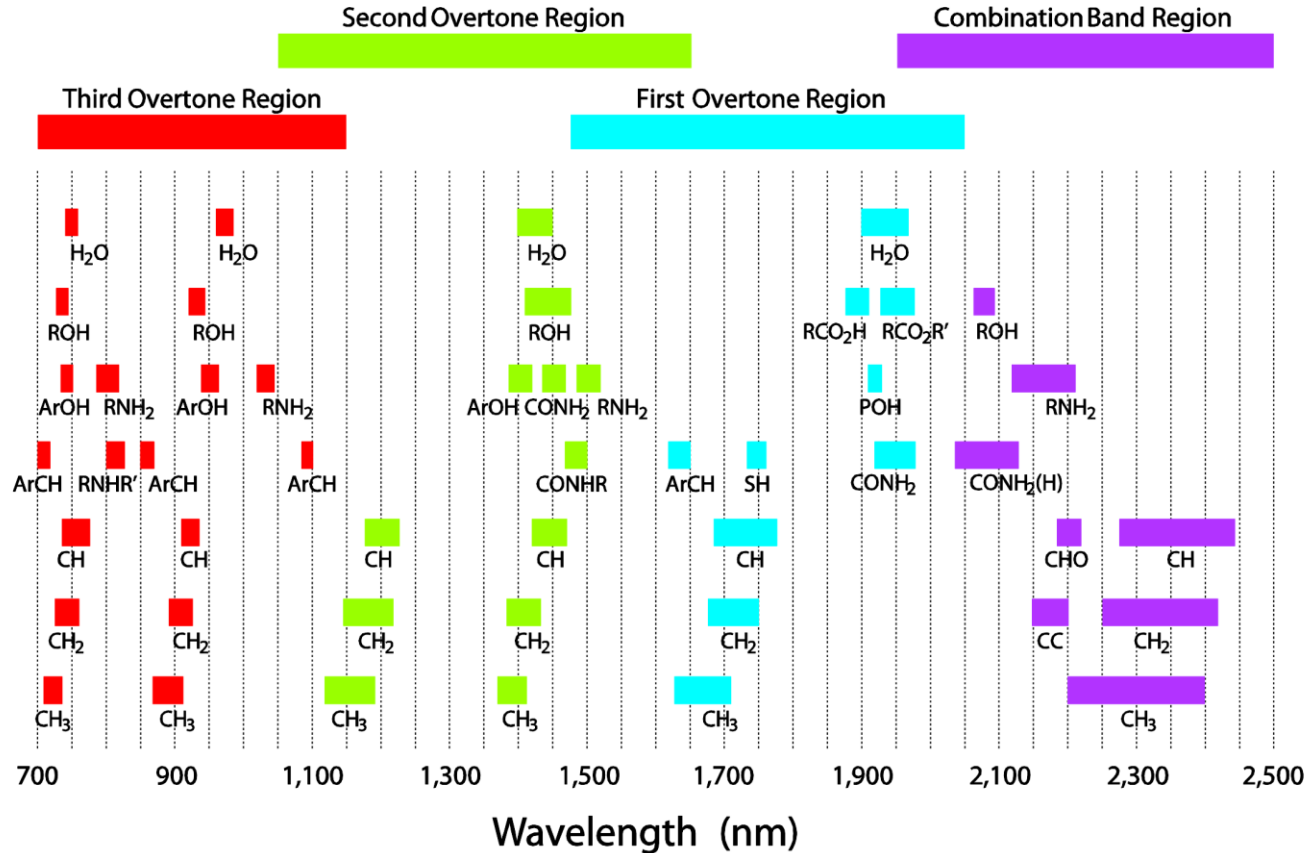
Optische Sensoren

Vis-NIR Spektroskopie

Diffuse Reflektion



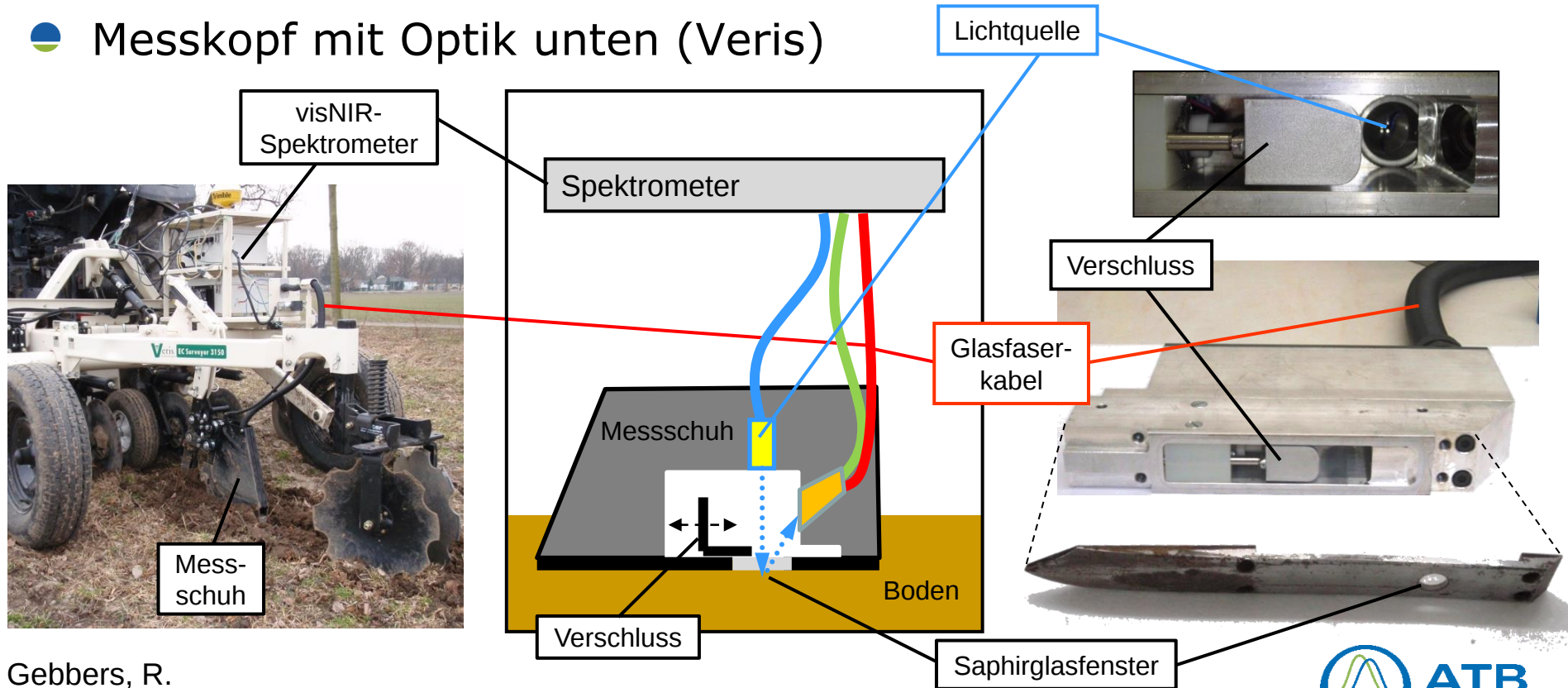
NIR-Spektroskopie: Bezüge



Überwiegend
indirekte Methode

Optische Spektroskopie: visNIR

● Messkopf mit Optik unten (Veris)

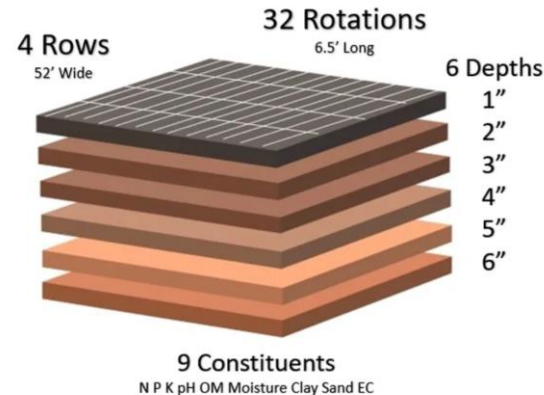


Gebbers, R.

NIR-Sensor SoilReader

- Messrad mit seitlicher Optik
- Mehrere Schichten im Oberboden
- Kalibrierung für 9 Inhaltsstoffe
- Online-fähig

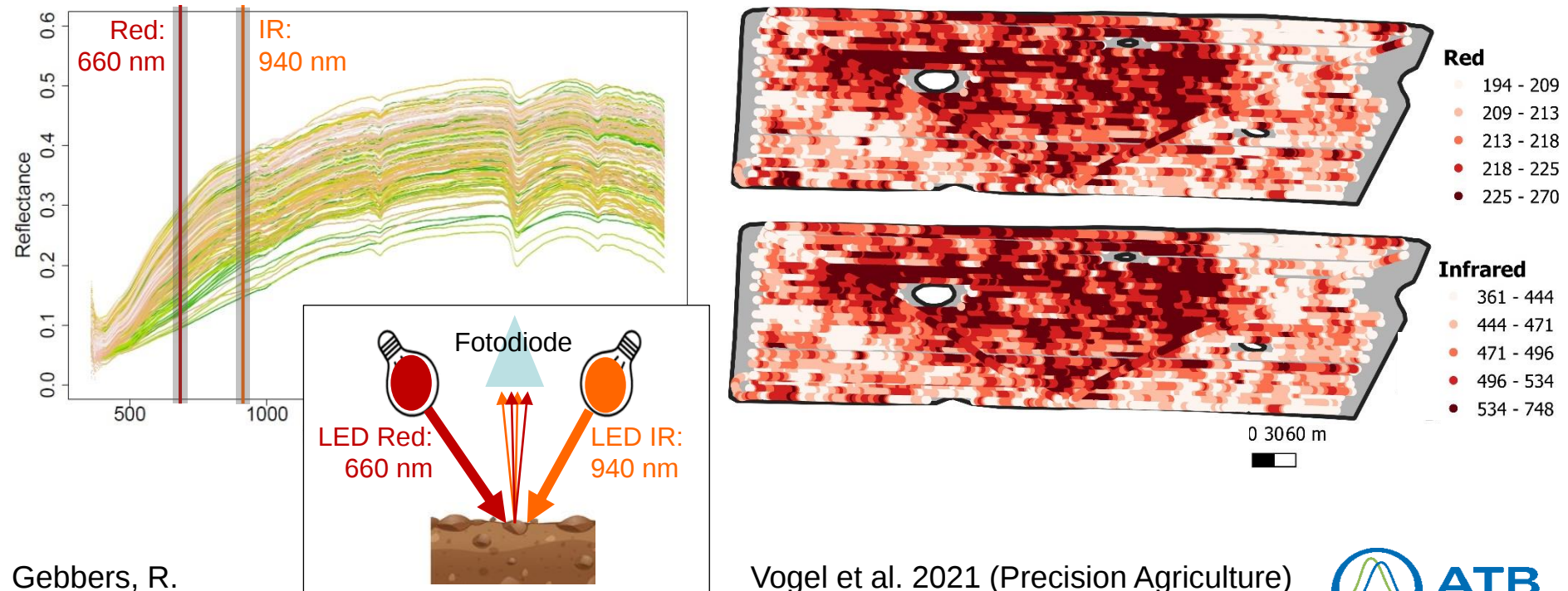
<https://soilreader.com/>



TB

Optische Spektroskopie: visNIR vereinfacht

Zwei Wellenlängen für Humusgehalt: Veris OpticMapper

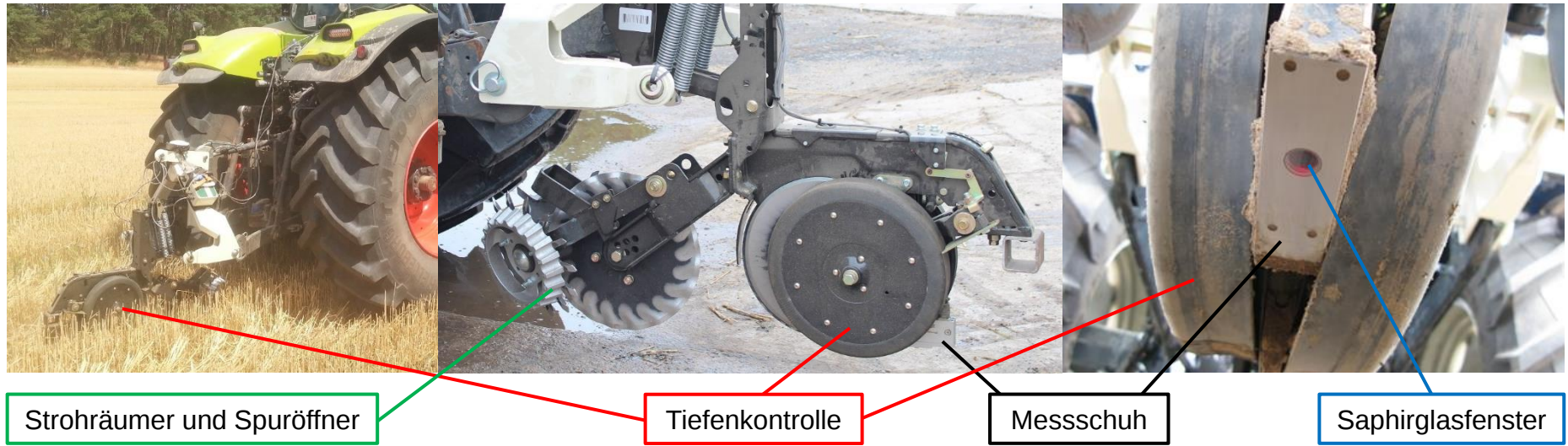


Gebbers, R.

Vogel et al. 2021 (Precision Agriculture)

Optische Spektroskopie: VisNir vereinfacht

Humusgehalt mit Veris OpticMapper

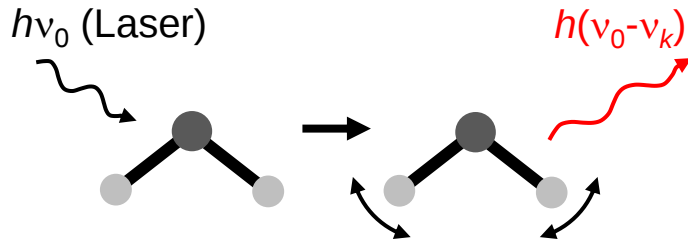


Optische Spektroskopie: Raman-Spektroskopie

Raman-Spektroskopie:

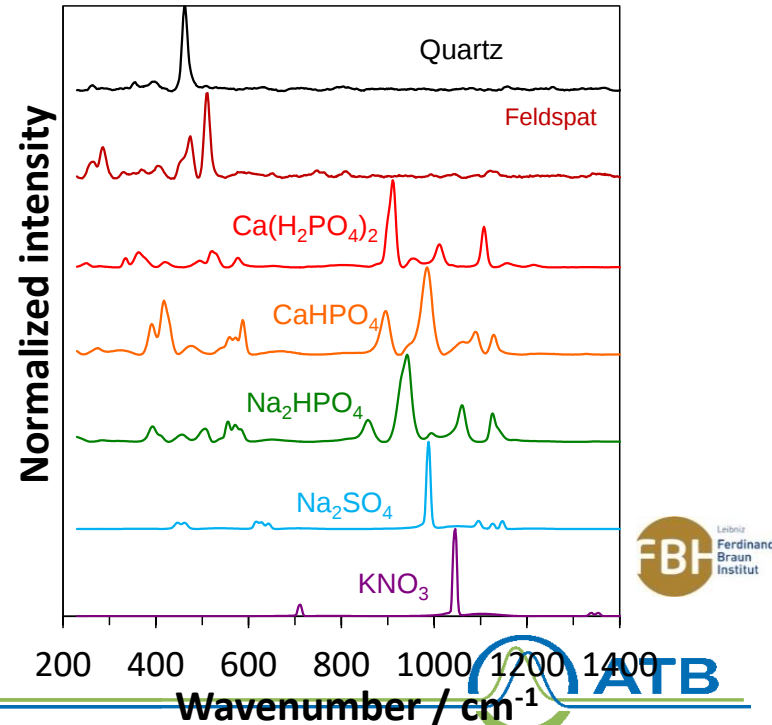
Prinzip und Spektren von relevanten Reinsubstanzen

Raman-Spektroskopie beruht auf inelastischer Streuung von Laser-Licht



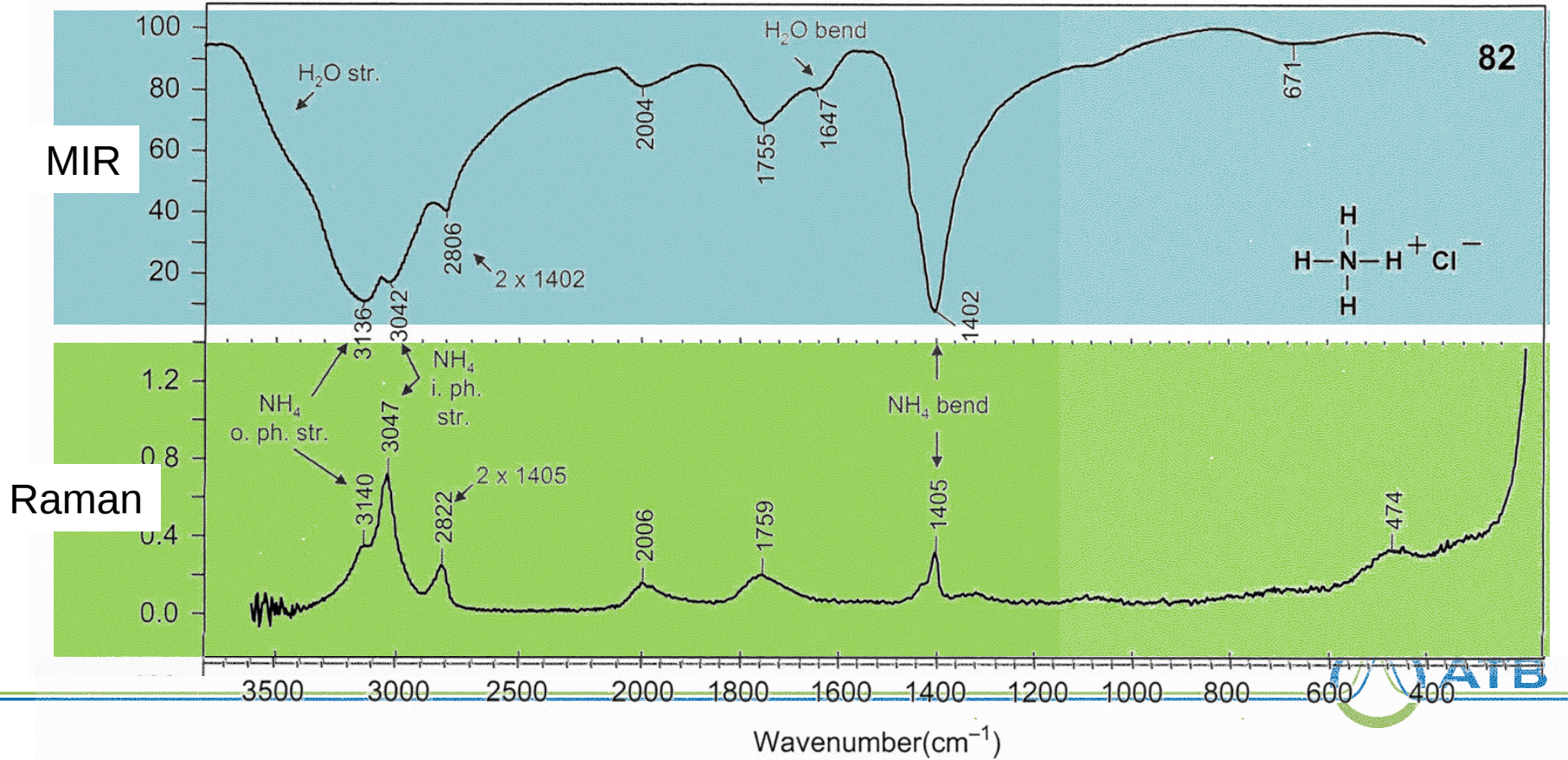
1. Auslösung molekularer Schwingungen
2. Gestreute Photonen haben geänderte Energie und somit andere Wellenlänge
3. Das resultierende Spektrum ist für jedes Molekül einzigartig

Spektren von Reinsubstanzen



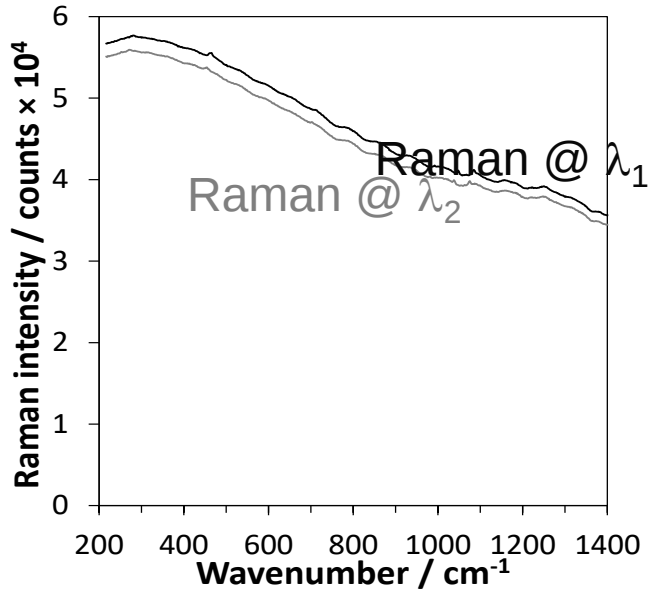
Raman-Spektroskopie: Korrespondenz zu mittlerem IR

Spektren von NH_4^+



Raman-Spektroskopie: Problematik bei Messung an Böden und Lösung durch SERDS

Tone und organische Substanzen erzeugen starke Fluoreszenz welche die Raman-Peaks überlagern

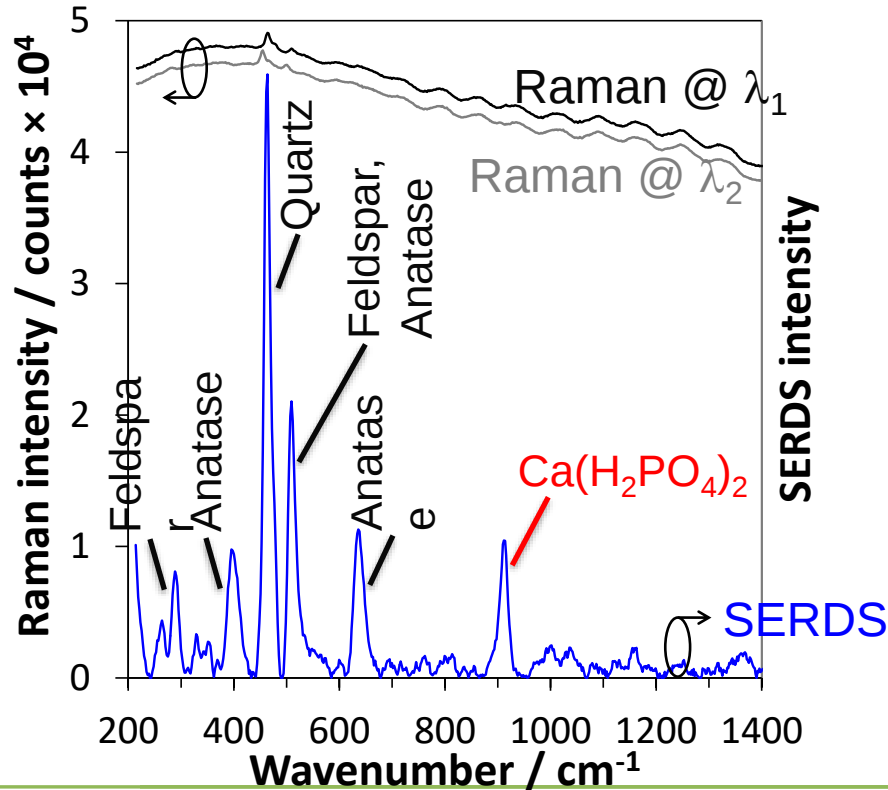


Lösung

- Nutzung von zwei Lasern mit sehr ähnlichen Wellenlängen
- Dadurch werden nahezu identische Fluoreszenzspektren erzeugt
- Durch Subtraktion der Spektren bleiben die Raman Peaks übrig

Shifted Excitation Raman Difference Spectroscopy (**SERDS**)

Raman-Spektroskopie: Problematik bei Messung an Böden und Lösung durch SERDS



Beispiel

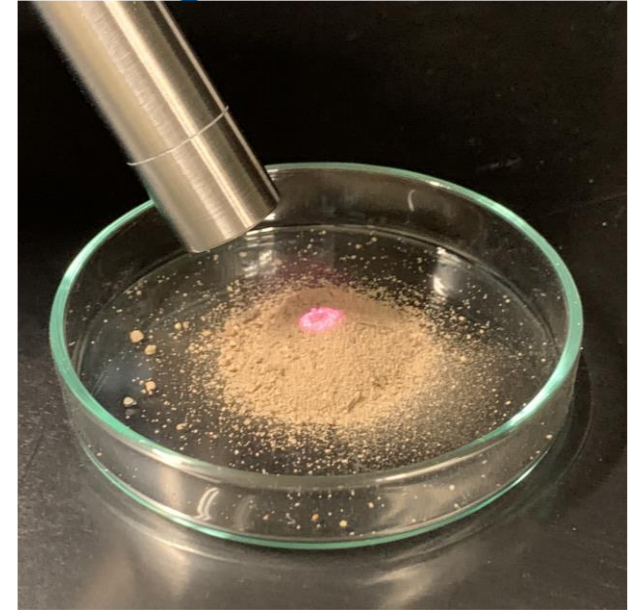
Identifikation von Mineralen:

- Quartz
- Anatas
- Feldspat
- Erfassung von Phosphat $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$

Raman-Spektroskopie: SERDS System für *in-situ* Bodenuntersuchung

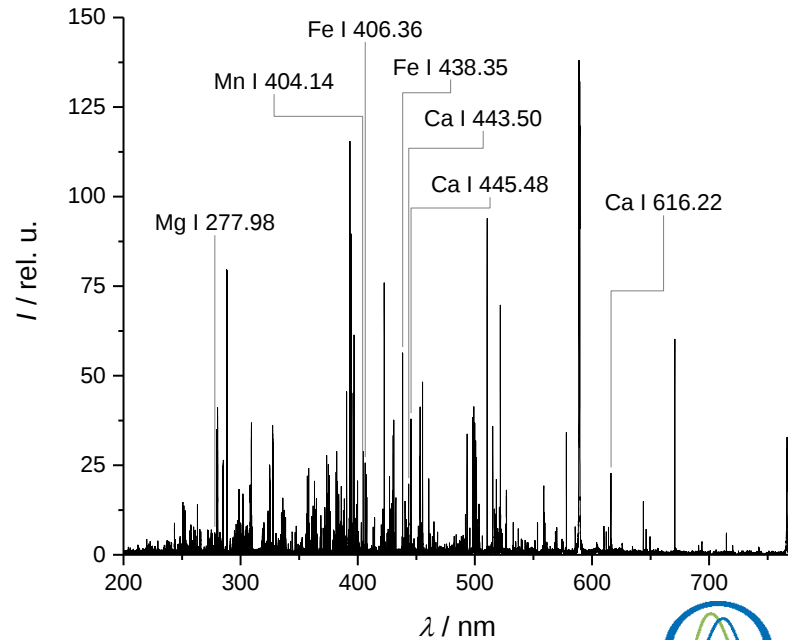
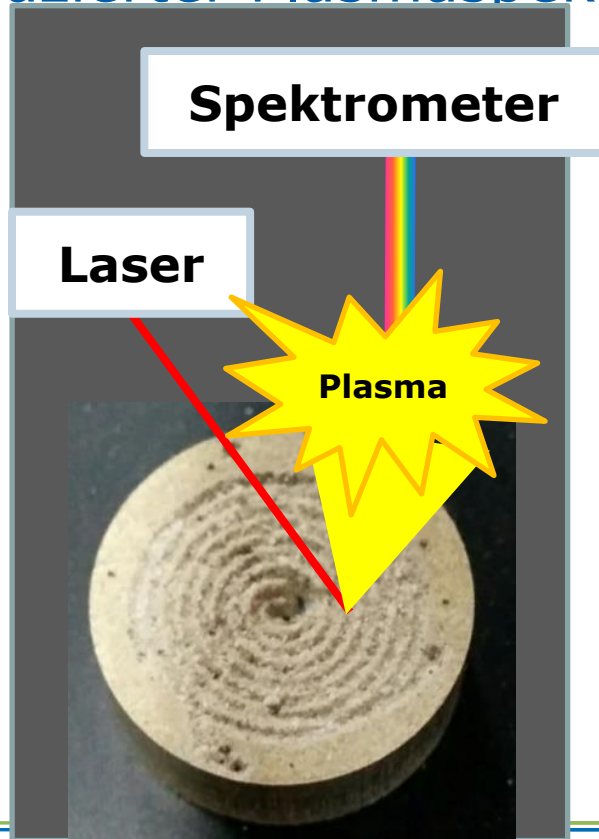
Hauptkomponenten

- Speziell entwickelte Dioden-Laser mit zwei Wellenlängen
- Robuster Sensorkopf, mit Kabel gekoppelt
- Spektrometer mit Detektor in robusten Gehäuse



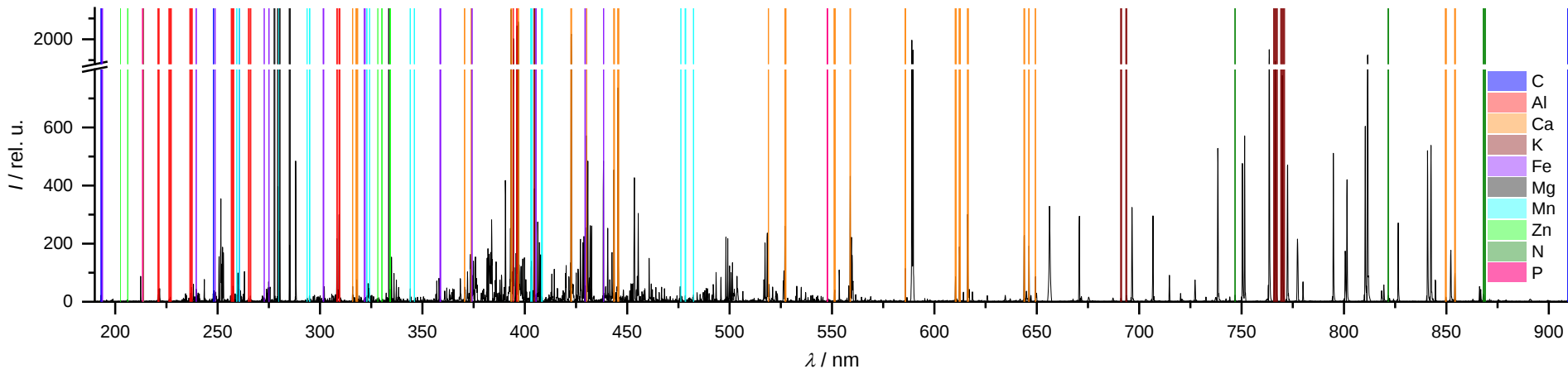
Optische Spektroskopie: LIBS

Mobile Elementanalytik mittels Laser-induzierter Plasmaspektroskopie (LIPS, LIBS)

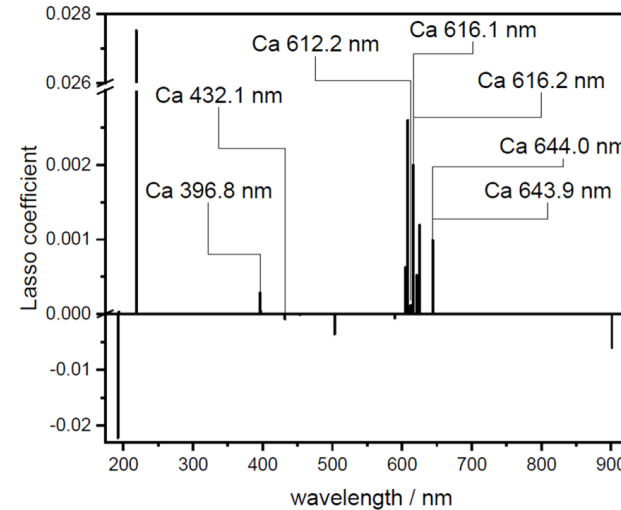
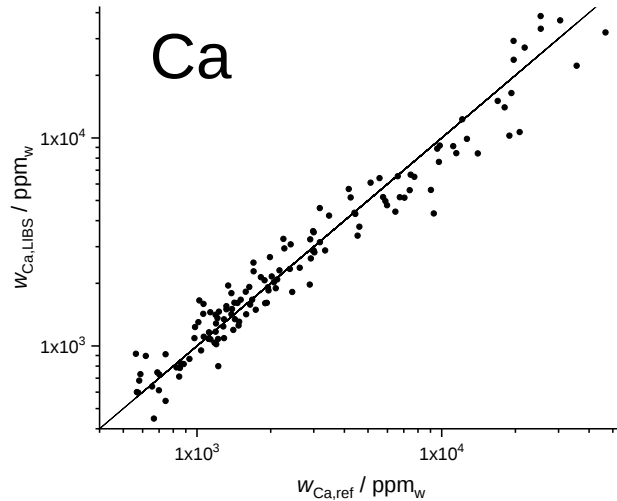


Mobile Elementanalytik mittels Laser-induzierter Plasmaspektroskopie (LIPS, LIBS)

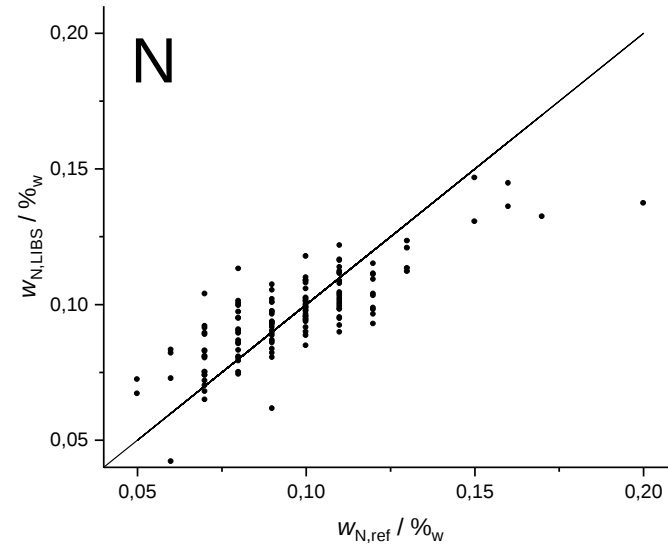
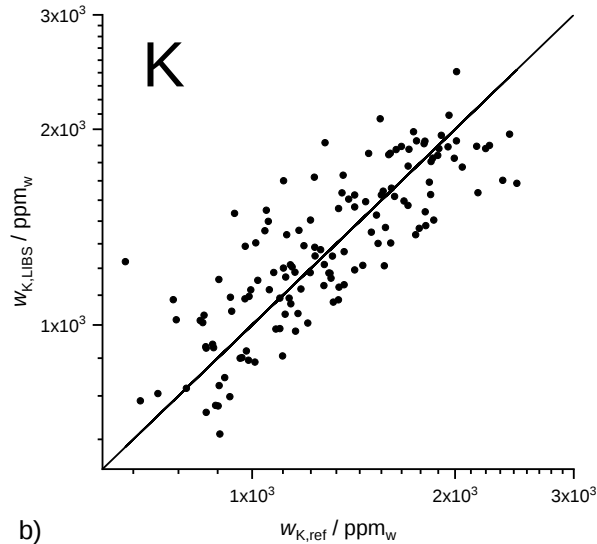
LIB-Spektrum einer Bodenprobe



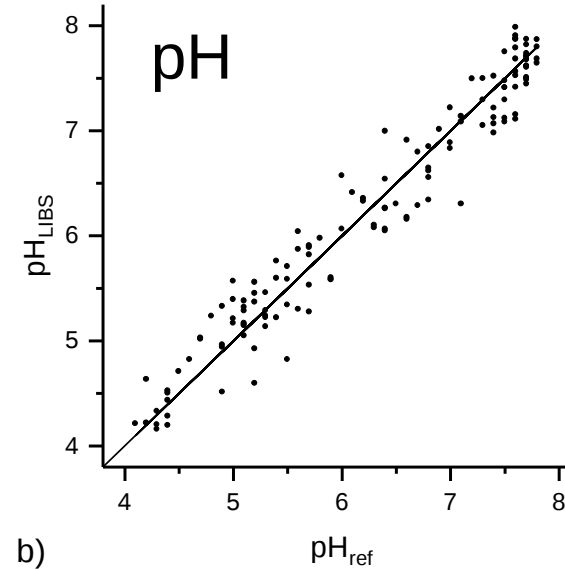
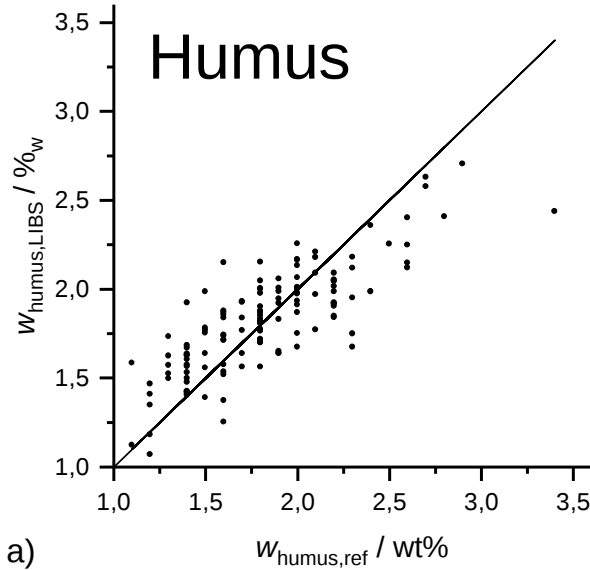
Mobile Elementanalytik mittels Laser-induzierter Plasmaspektroskopie



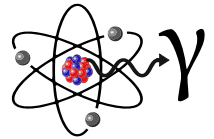
Mobile Elementanalytik mittels Laser-induzierter Plasmaspektroskopie



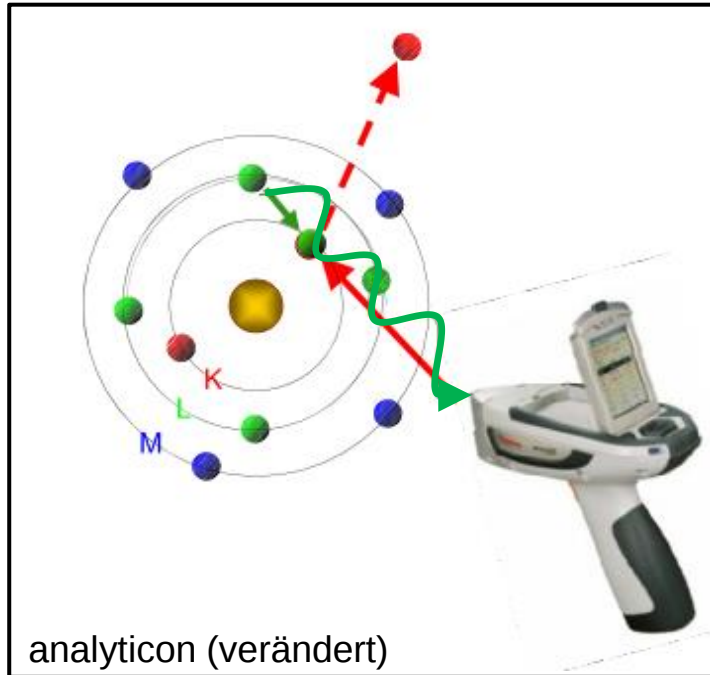
Mobile Elementanalytik mittels Laser-induzierter Plasmaspektroskopie



Sensoren für ionisierende Strahlung



Röntgenfluoreszenzanalyse, RFA (Elementgesamtgehalte):



1. Anregung von Elektronen durch hochenergetische Röntgenstrahlung 
2. Herausschlagen von Elektronen aus der Atomhülle 
3. Ersatz durch Elektronen aus höherer Schale (Energieniveau) 
4. Energiedifferenz als Photonen abgegeben (Fluoreszenzstrahlung, Energieabgabe charakteristisch für Atom eines bestimmten Elements) 

Röntgenfluoreszenzanalyse, RFA (Elementgesamtgehalte):

Hauptgruppen			Modus Minerale										Hauptgruppen						
I	II	III											IV	V	VI	VII			
1. H 1 Wasserstoff			nicht messbar	kein Standardelement															
2. Li 3 Lithium	Be 4 Beryllium		Standard-Filter	Niedrig-Filter											B 5 Bor	C 6 Kohlenstoff	N 7 Stickstoff	O 8 Sauerstoff	F 9 Fluor
3. Na 11 Natrium	Mg 12 Magnesium	Nebengruppen										Al 13 Aluminium	Si 14 Silicium	P 15 Phosphor	S 16 Schwefel	Cl 17 Chlor			
4. K 19 Kalium	Ca 20 Calcium		Sc 21 Scandium	Ti 22 Titan	V 23 Vanadium	Cr 24 Chrom	Mn 25 Mangan	Fe 26 Eisen	Co 27 Kobalt	Ni 28 Nickel	Cu 29 Kupfer	Zn 30 Zink	Ga 31 Gallium	Ge 32 Germanium	As 33 Arsen	Se 34 Selen	Br 35 Brom		
5. Rb 37 Rubidium	Sr 38 Strontium		Y 39 Yttrium	Zr 40 Zirkonium	Nb 41 Niob	Mo 42 Molybdän	Tc 43 Technetium	Ru 44 Ruthenium	Rh 45 Rhodium	Pd 46 Palladium	Ag 47 Silber	Cd 48 Cadmium	In 49 Indium	Sn 50 Zinn	Sb 51 Antimon	Te 52 Tellur	I 53 Iod		
6. Cs 55 Caesium	Ba 56 Barium	57 - 70	Lu 71 Lutetium	Hf 72 Hafnium	Ta 73 Tantal	W 74 Wolfram	Re 75 Rhenium	Os 76 Osmium	Ir 77 Iridium	Pt 78 Platin	Au 79 Gold	Hg 80 Quecksilber	Tl 81 Thallium	Pb 82 Blei	Bi 83 Wismut	Po 84 Polonium	At 85 Astat		

Fluoreszenzstrahlung
steigt mit Ordnungszahl
der Elemente →
Elementerfassung
abhängig von
Atomgewicht/
-durchmesser und
Filtereinstellung

Röntgenfluoreszenzanalyse, RFA (Elementgesamtgehalte):

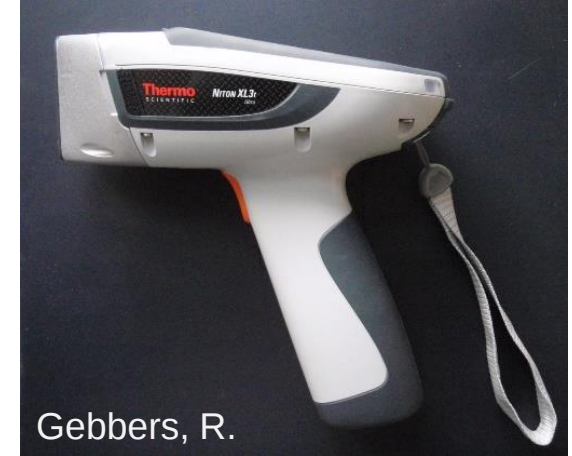
Direkte Erfassung von:

- Gesamtgehalten von Nährstoffen wie **Mg, P, S, K, Ca** (Gebbers & Schirrmann 2015),
- **Schwermetalle** (Ulmanu et al. 2011),

Indirekte Erfassung von:

- **pH-Wert** über die Ca-Konzentration (Sharma et al. 2014; Gebbers & Schirrmann 2015),
- **Organischen Kohlenstoff (Humus) & Stickstoff** über die S-Gehalt (Gebbers & Schirrmann 2015),
- **Kationenaustauschkapazität** (Sharman et al. 2015),
- **Tongehalt** über die Fe-Konzentration (Zhu, Weindorfer & Zhang, 2011; Gebbers & Schirrmann, 2015)

Nachteile: - Sicherheitsanforderungen durch den **Strahlenschutz**
- im Vergleich zu optischen Verfahren **lange Messzeit** von 1 bis 2 Minuten



Gamma-Spektroskopie

Gamma-Spektroskopie

Analyse der Gamma-Strahlung aus dem Zerfall von Radionukliden

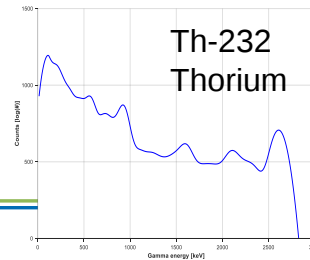
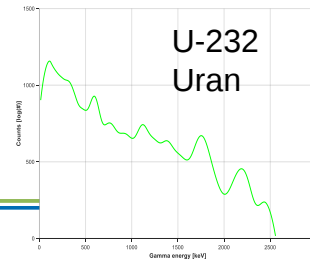
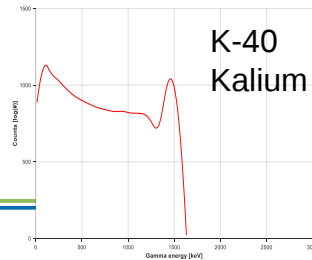
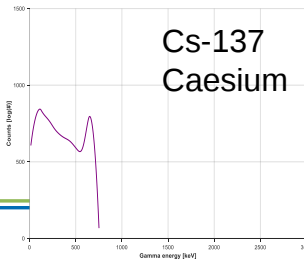
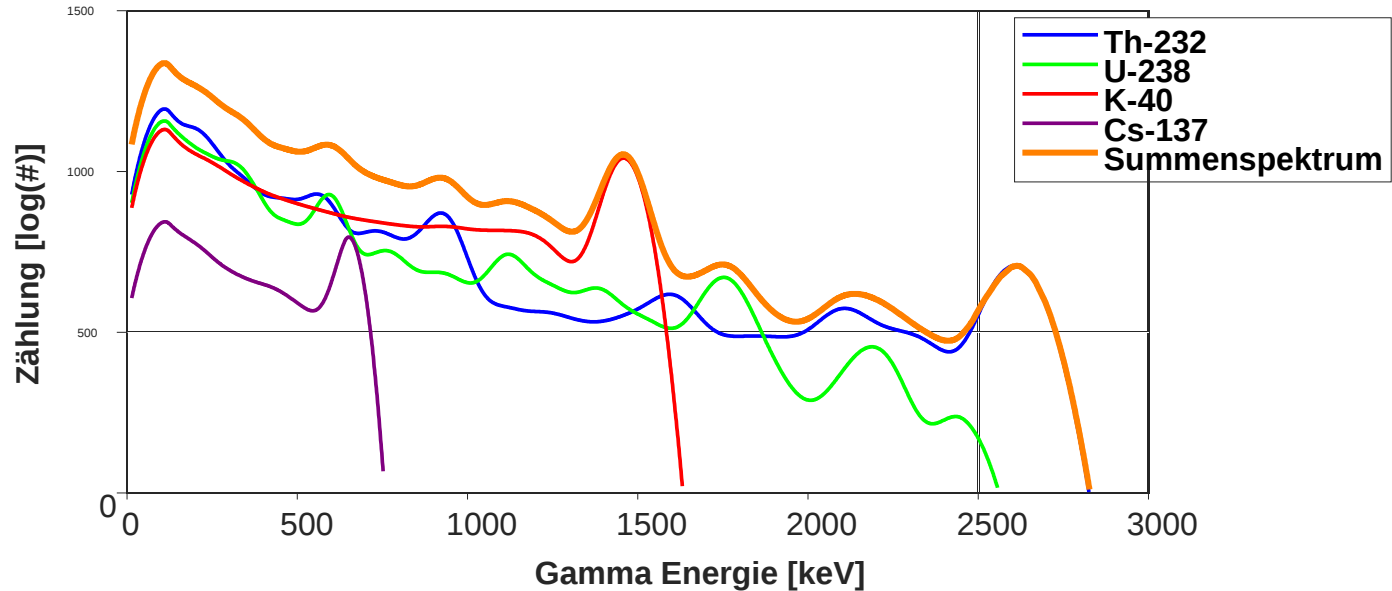
Haupt-Nuklide (natürlich):

- **Uran-238** (^{238}U)
- **Kalium-40** (^{40}K)
- **Thorium-232** (^{232}Th)

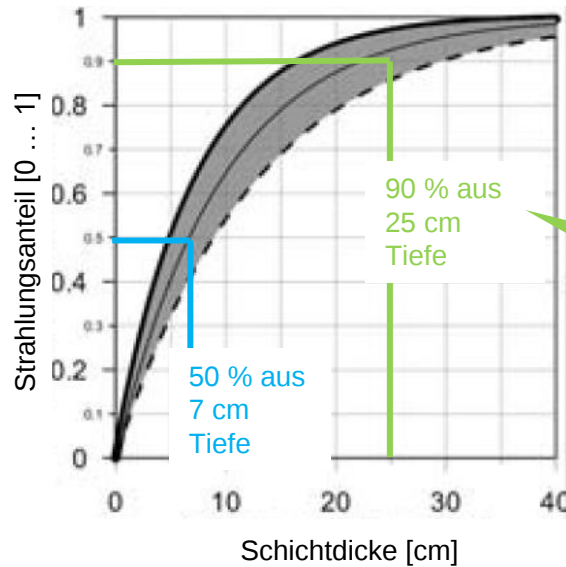
- **Cs aus Atomkraft und Atombomben**

Die höchsten Werte in Mittelgebirgen (bis zu 1,3 mSv/Jahr), niedrigsten in Norddeutschland (ca. 0,25 mSv/Jahr).

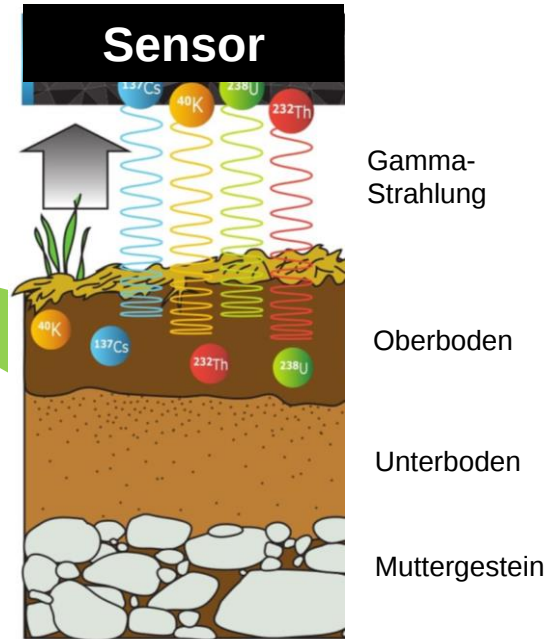
Gamma-Spektroskopie



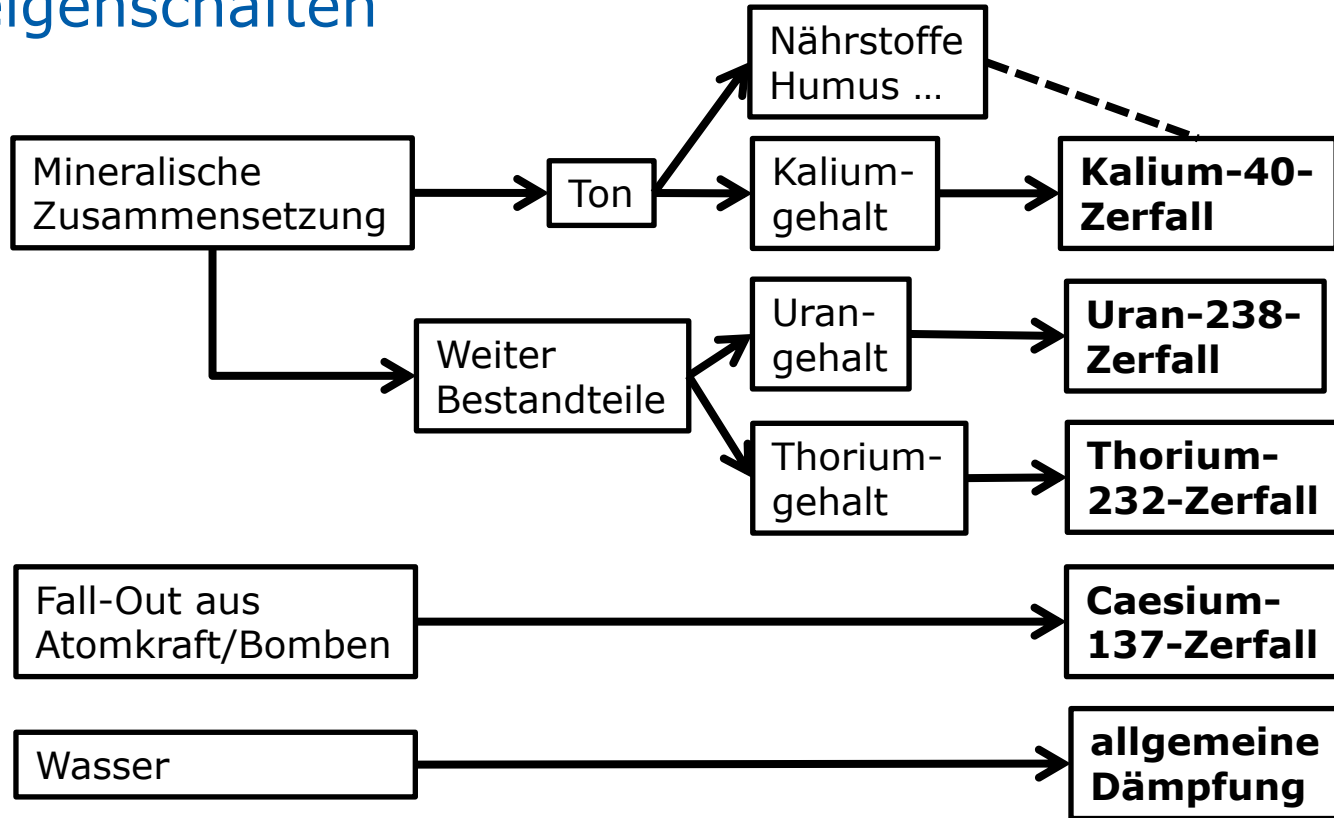
Gamma-Spektroskopie: Herkunft des Signals



Verringerung der Tiefe mit zunehmenden Wassergehalt



Gamma-Spektroskopie: Zusammenhang mit Bodeneigenschaften



Gamma-Spektroskopie: Geräte

Medusa MS-2000 bzw. SoilOptix

- Robuster CsI-Kristall, 9*31 cm
- 12,5 kg
- Hersteller Medusa, NL



Dienstleistung SoilOptix, Kanada

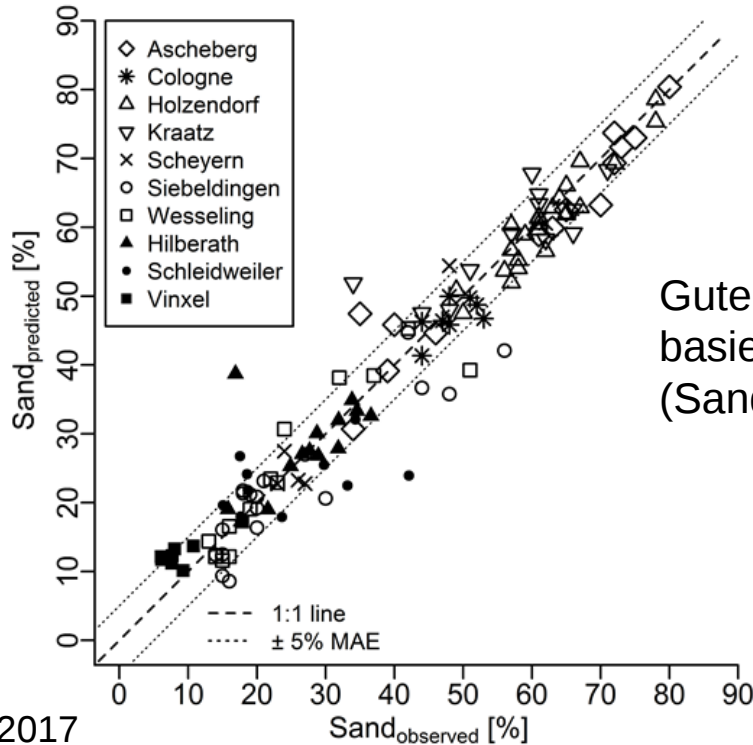
Partner in Deutschland: geo-konzept

Behauptet Schätzung von bis zu 25 Parametern,
u.a.:

- Textur (Ton, Lehm, Sand)
- Humus
- pH
- P, K, Mg, Ca
- Lagerungsdichte
- Verfügbares Wasser



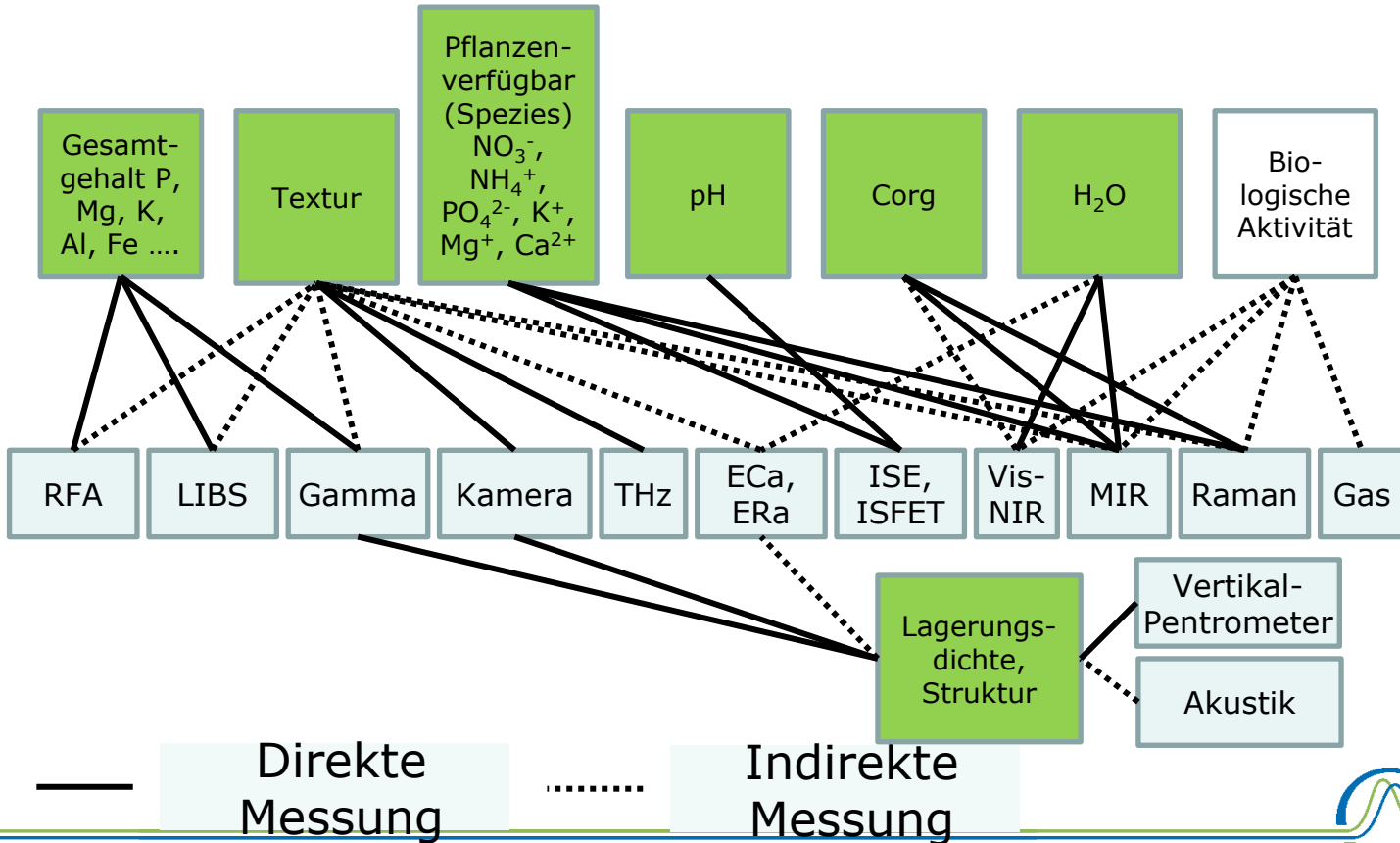
Gamma-Spektroskopie: Erfassung der Textur



Gute Ergebnisse bei der Bodentexturschätzung basierend auf einem landesweiten Datensatz (Sand $r^2=0,96$, Schluff $r^2=0,93$, Ton $r^2=0,78$).

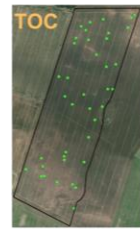
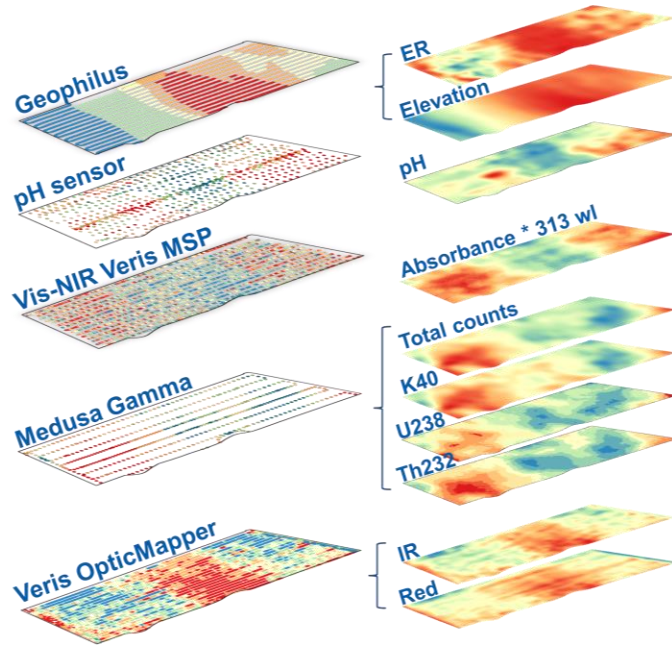
Übersicht zu Sensoren

Sensoren und Zielgröße

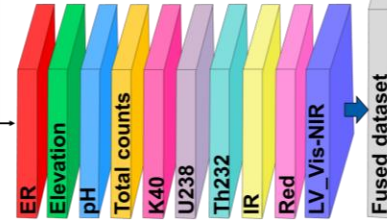


Sensorplattformen (Sensorfusion) und Sensordatenfusion

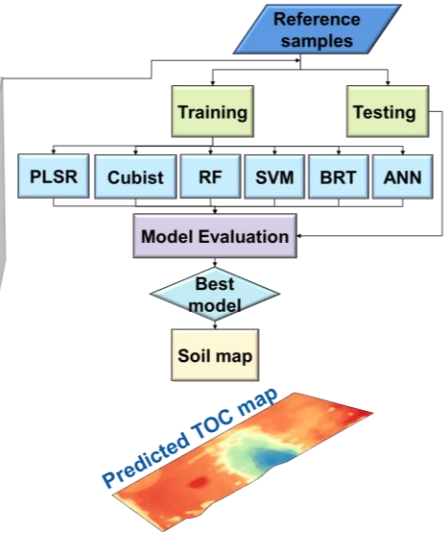
Kartierung der organischen Bodensubstanz



Referenzproben



Machine Learning



Sensoren

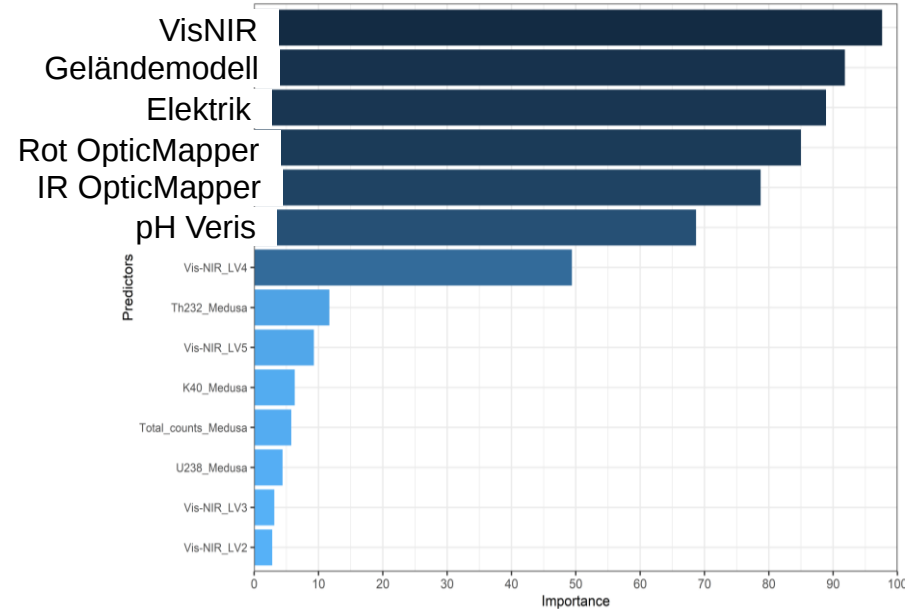
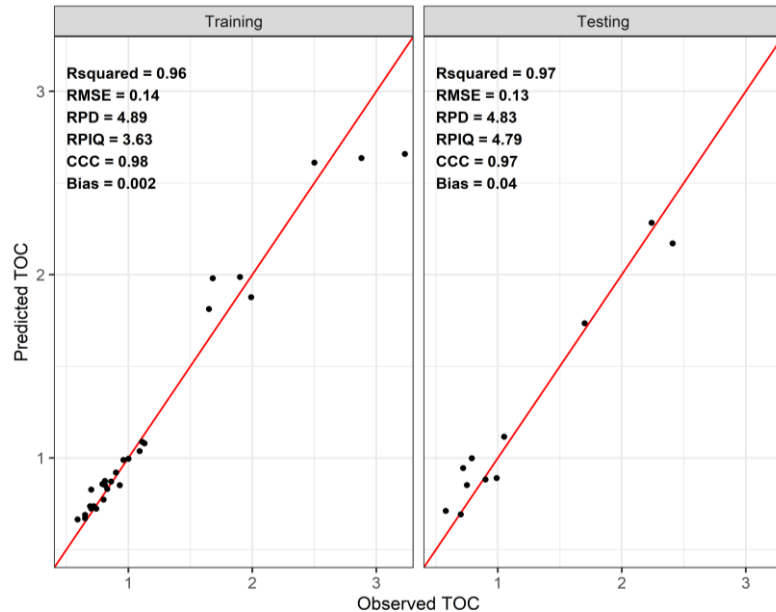
Kartierung der organischen Bodensubstanz

Schätzfehler OpticMapper allein: 0,64 %

Schätzfehler Sensorkombination: 0,13 %

Schätzgenauigkeit bei Trainings- und Testdaten

Relevanz der Sensoren



Multisensorplattformen von Veris Technologies



MSP3

Most popular, powerful model. Maps EC at 2-3 depths, OM and pH on-the-go.



U Series

Maps soil EC, OM, and pH behind a UTV. Uses SpeedRead™ pH technology to take pH readings in ~10 sec.



V3150 and OpticMapper

The base V3150 measures EC at two depths. It can be configured with a dual-wavelength OM sensors (OpticMapper) and on-the-go pH sensing module (MSP3).



P4000

The Veris 4-Sensor probe acquires spectral measurements in the visible and near-infrared range, along with soil EC and insertion force sensing. Also equipped to take deep soil cores.

1. ECa
2. pH-Manager (on-the-go)
3. OpticMapper

1. ECa
2. pH-Manager (stop-and-go)
3. OpticMapper

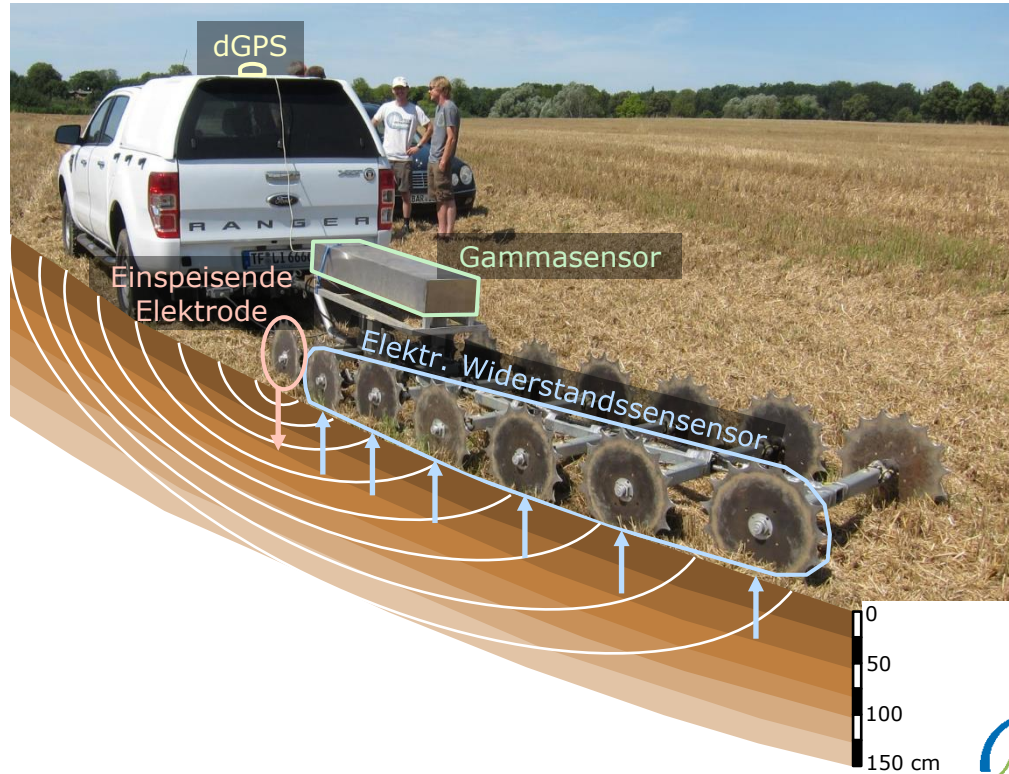
1. ECa
2. OpticMapper

1. Durchdringungswiderstand
2. OpticMapper
3. ECa

<https://veristech.com/>

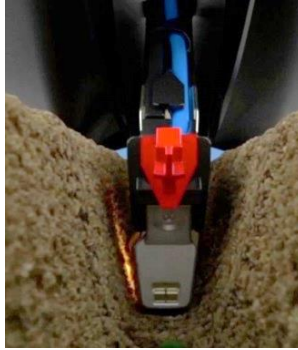
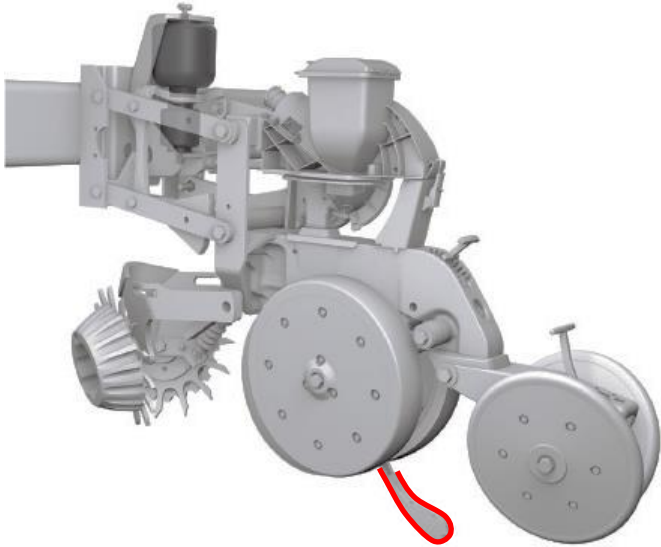
Multisensorplattformen von Geophilus

- Kombination aus Geoelektrik und Gammastrahlungssensor
- misst scheinbaren elektr. Widerstand (ERa) in 6 Tiefen bis 1.5m Tiefe
- Gammasignal weniger sensitiv für Bodenfeuchte → Feuchtekorrektur von ERa



Multisensorplattformen von Precision Planting

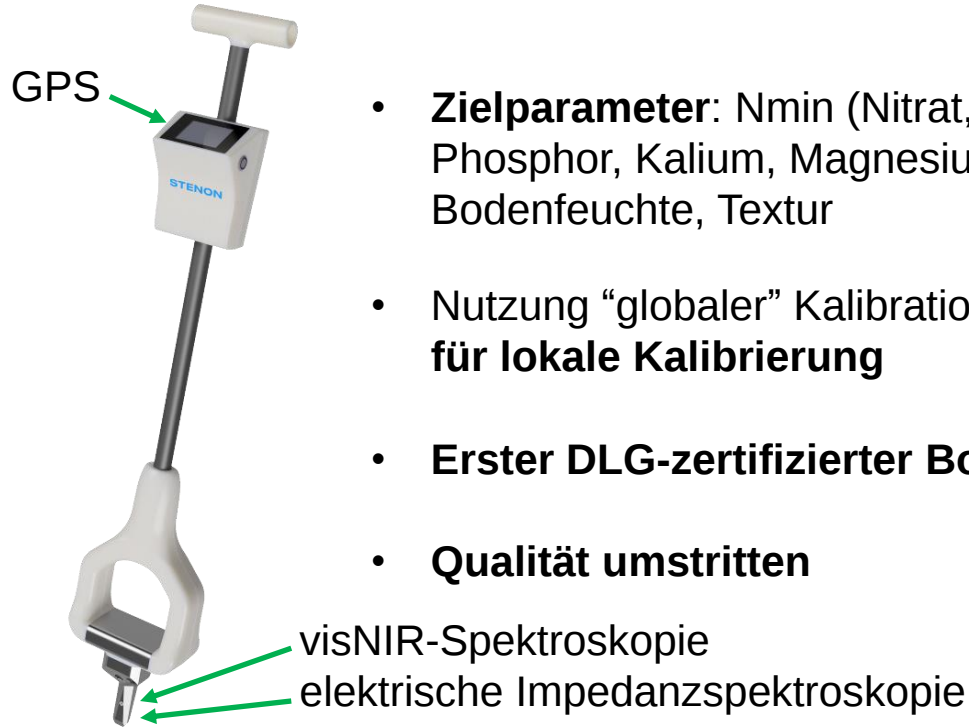
SmartFirmer (sensorbasierte Aussaatmaschine)



- nutzt engbandige Lichtquellen: blau, orange, infrarot
- mögliche andere Sensoren: Druck, IR Thermometer (keine genauen Angaben erhältlich)
- erfasst Feuchte, Temperatur, Humus, Furchenstruktur
→ an Bodenfeuchte angepasste Ablagetiefe und Schardruck
- keine unabhängige wissenschaftliche Evaluierung

Multisensorplattformen der Firma STENON

Stenon FarmLab



- **Zielparameter:** Nmin (Nitrat, Ammonium), pflanzenverfügbarer Phosphor, Kalium, Magnesium, pH-Wert, Humus, Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Textur
- Nutzung “globaler” Kalibrationsmodelle: **Verzicht auf Laboranalysen für lokale Kalibrierung**
- **Erster DLG-zertifizierter Bodensensor**
- **Qualität umstritten**



STENON FARMLAB
MIT SOFTWAREVERSION D-1.3.0
UND KALIBRIERMODELL P-2.1.0

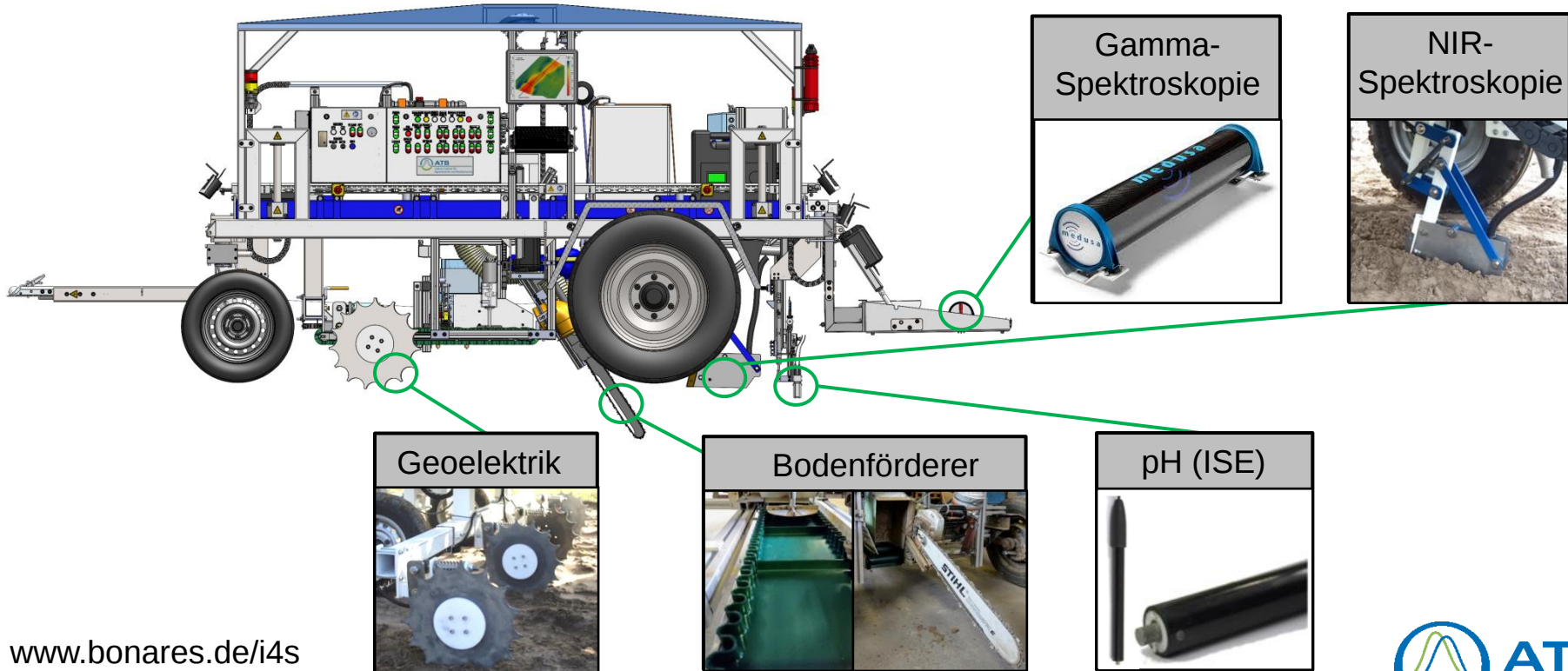
- ✓ NO₃-Gehalt
- ✓ N_{min}-Gehalt
- ✓ Bodenfeuchte

DLG-Prüfbericht 7197

<https://stenon.io/>

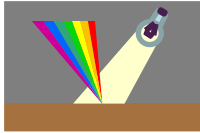
Multisensorplattform RapidMapper

RapidMapper (im Projekt I4S entwickelter Demonstrator)

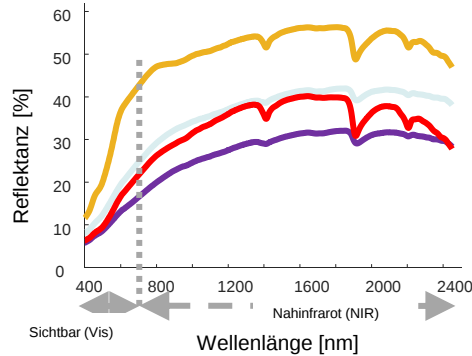


Multisensorplattform RapidMapper: Sensoren

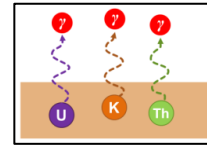
Vis-NIR Spektrometrie



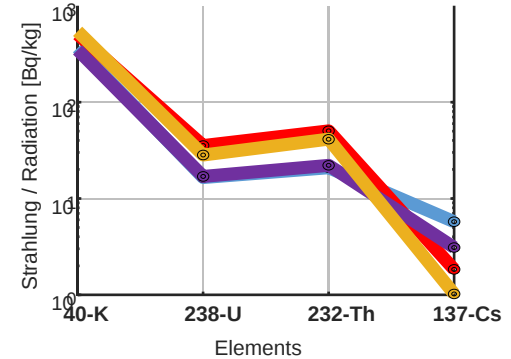
- Sand, schwach humos / Sand, low humus
- Sand, stark humos / Sand, high humus
- Schluff, humusfrei / Silt, no humus
- Ton, humusfrei / Clay, no humus



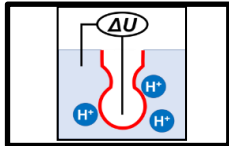
Gamma-Spektrometrie



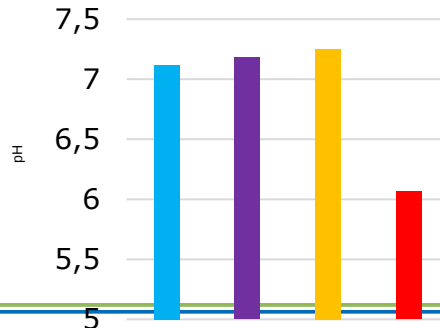
- Sand, schwach humos / Sand, low humus
- Sand, stark humos / Sand, high humus
- Schluff, humusfrei / Silt, no humus
- Ton, humusfrei / Clay, no humus



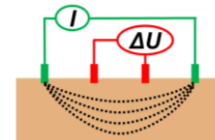
pH Potentiometrie



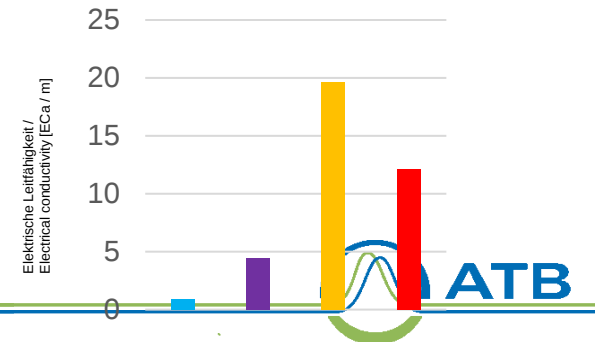
- Sand, schwach humos / Sand, low humus
- Sand, stark humos / Sand, high humus
- Schluff, humusfrei / Silt, no humus
- Ton, humusfrei / Clay, no humus



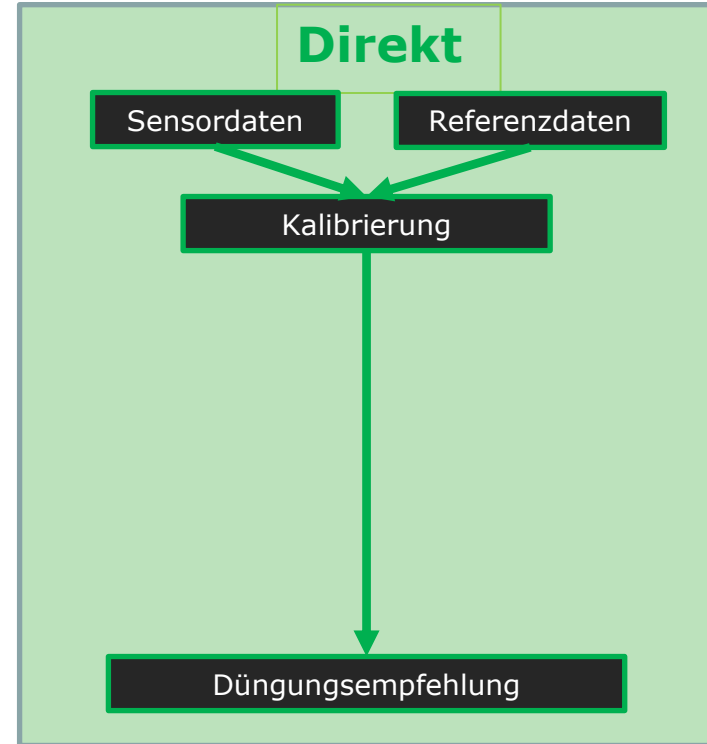
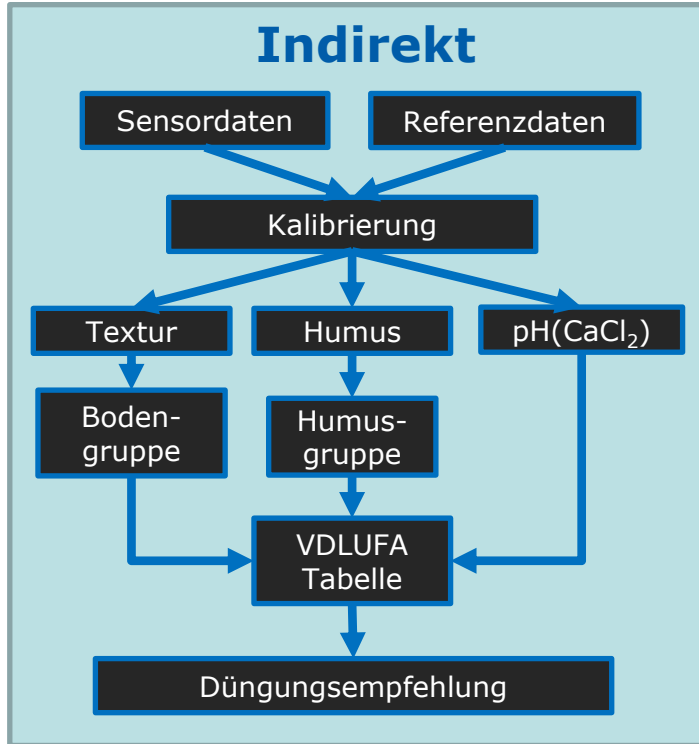
Geoelektrik



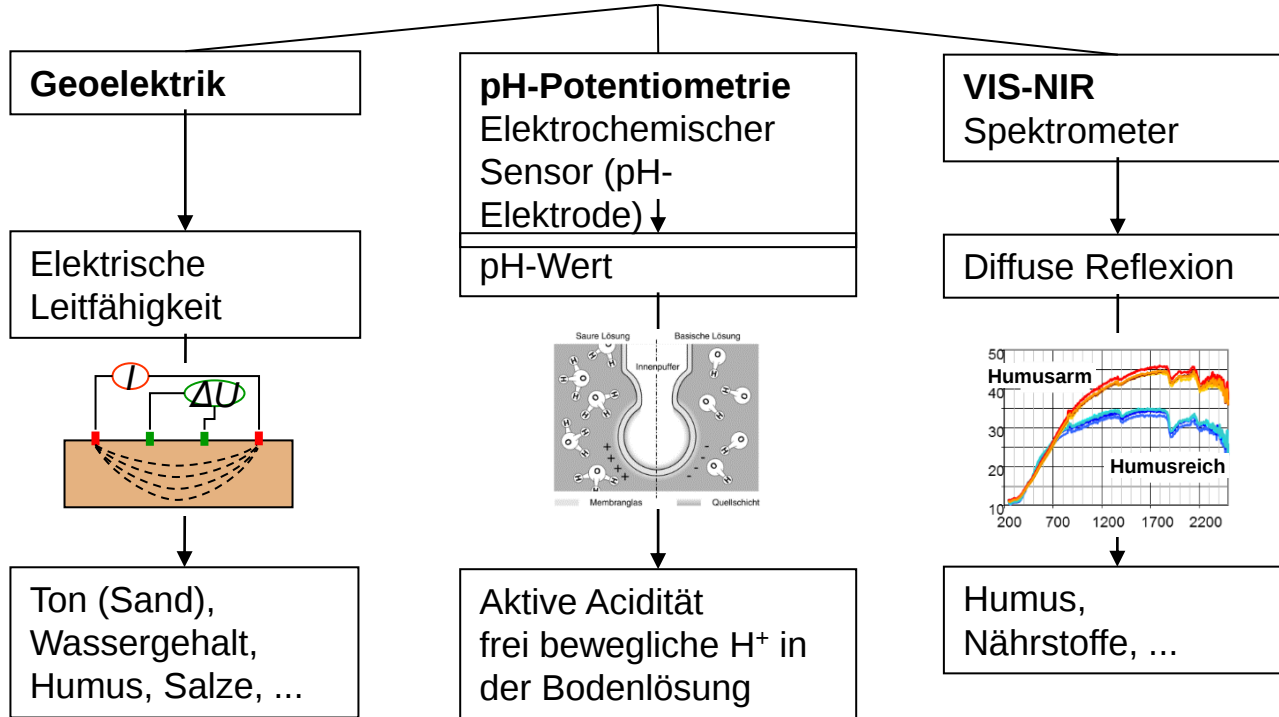
- Sand, schwach humos / Sand, low humus
- Sand, stark humos / Sand, high humus
- Schluff, humusfrei / Silt, no humus
- Ton, humusfrei / Clay, no humus



Kalkbedarfsermittlung: Indirekter und direkter Ansatz



Kalkbedarfsermittlung: Sensorkombination

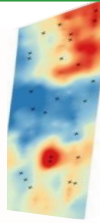
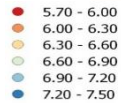


Kalkbedarfsermittlung: Indirekt

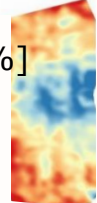


VDLUFA-
Tabelle

pH-Wert



Humus-
gehalt [%]



pH- Klasse	Humusgehalt											
	≤ 4,0 %				4,1 bis 8,0 %				8,1 bis 15,0 %			
	pH	CaO	pH	CaO	pH	CaO	pH	CaO	pH	CaO	pH	CaO
A	≤ 4,0	45	≤ 3,7	50	≤ 3,4	50	≤ 3,1	21	≤ 2,8	10	≤ 2,5	10
	4,1	42	3,8	46	3,5	47	3,2	19	2,9	18	2,6	18
	4,2	39	3,9	43	3,6	43	3,3	18	3,0	16	2,7	16
	4,3	36	4,0	39	3,7	39	3,4	16	3,1	15	2,8	15
	4,4	33	4,1	35	3,8	35	3,5	15	3,2	13	2,9	13
	4,5	30	4,2	32	3,9	31	3,6	13	3,3	12	3,0	12
B	4,6	27	4,3	28	4,0	28	3,7	12	3,4	10	3,1	10
	4,7	24	4,4	24	4,1	24	3,8	10	3,5	9	3,2	9
	4,8	22	4,5	21	4,2	20	3,9	9	3,6	8	3,3	8
	4,9	19	4,6	17	4,3	16	4,0	7	3,7	7	3,4	7
	5,0	16	4,7	13	4,4	13	4,1	6	3,8	6	3,5	6
	5,1	13	4,8	10	4,5	9	4,2	4	3,9	5	3,6	5
C	5,2	10	4,9	6	4,6	5	4,3	4	4,0	3	3,7	3
	5,3	7	5,0	5	4,7	4	4,4	3	4,1	2	3,8	2
D	5,4 - 5,8	6	5,0 - 5,4	5	4,7 - 5,1	4	4,3 - 4,7	3	4,0 - 4,4	2	3,6 - 4,0	1
	5,9 - 6,2	-	5,5 - 5,8	-	5,2 - 5,4	-	4,8 - 5,1	-	4,5 - 4,7	-	4,2 - 4,4	-
E	≥ 6,3	-	≥ 5,9	-	≥ 5,5	-	≥ 5,2	-	≥ 4,8	-	≥ 4,4	-

Boden-
textur



Kalkbedarf
[dt CaO/ha]

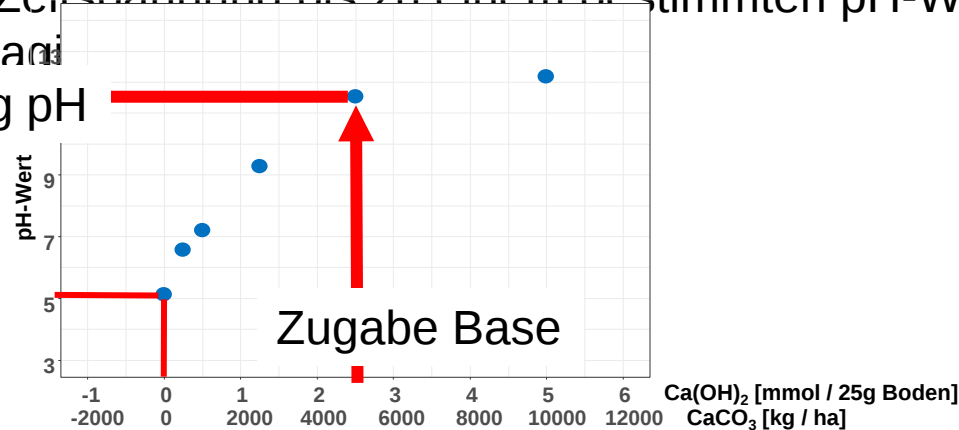


Kalkbedarfsermittlung: Direkte sensorbasierte Schätzung: Basenneutralisationskapazität (BNK) als Grundlage

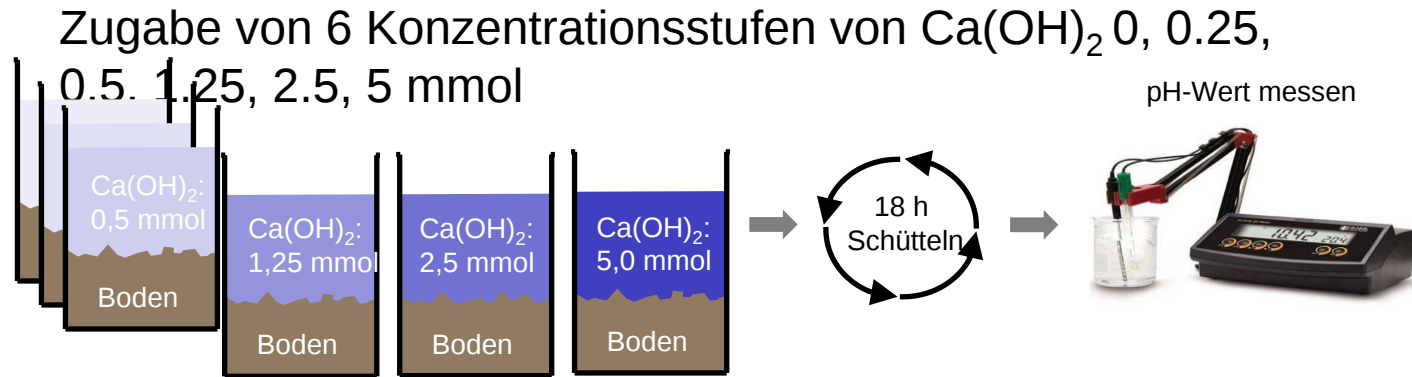
Die BNK ist die Säuremenge im Boden, die innerhalb einer bestimmten Zeitspannung bis zu einem bestimmten pH-Wert mit Basen reagiert

Veränderung pH

pH ohne
Zugabe
einer Base

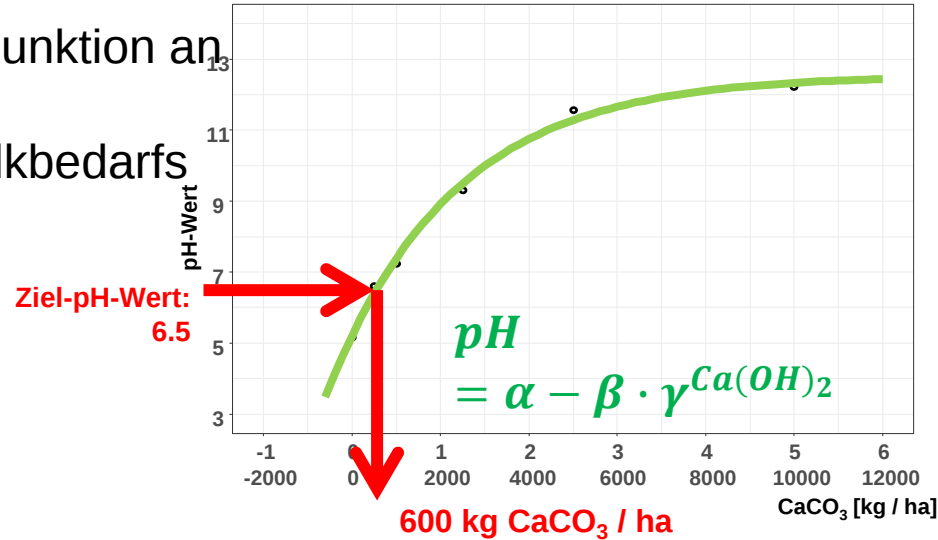


Kalkbedarfsermittlung: Direkte sensorbasierte Schätzung: Basenneutralisationskapazität (BNK) als Grundlage



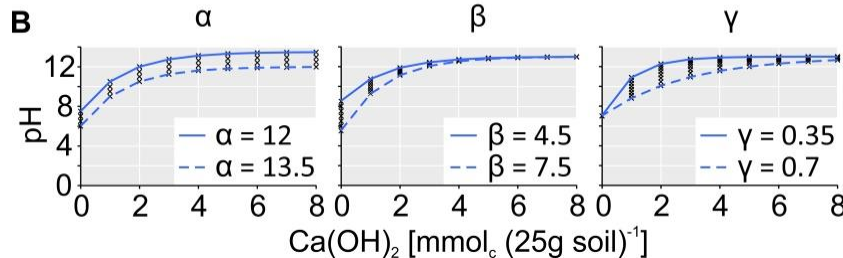
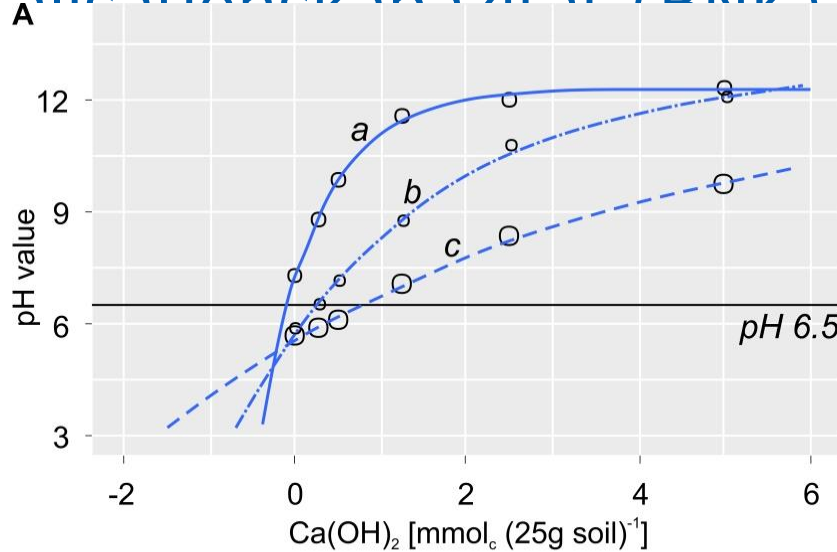
Kalkbedarfsermittlung: Direkte sensorbasierte Schätzung: Basenneutralisationskapazität (BNK) als Grundlage

- Anpassung einer Funktion an die Messwert
- Berechnen des Kalkbedarfs für den Ziel-pH



Kalkbedarfsermittlung: Direkte sensorbasierte Schätzung: Basenneutralisationskapazität (BNK) als Grundlage

Spannweite von BNK
Kurven, Brandenburg



Bedeutung
der
Parameter
der BNK-

Praxisrelevante Sensoren und ihre Zielgrößen

Sensor	Zielgrößen	Direkte Messung	Kalibrier-aufwand	Robustheit	Schnelligkeit
Geoelektrik	Textur, Wasser	-	-	++	+
Gamma-Spektroskopie	Textur, Kalium	0	-	+	0/+
pH-Potentiometrie mit Antimon-Elektrode	pH-Wert	++	0	0	-
Optische Spektroskopie	Humus (Nährstoffe, Textur)	-	-	+	++
Penetrometer	Lagerungsdichte	0	-	++	--

5. Schlussfolgerungen

Anforderungen und Probleme der Bodenkartierung durch Nahbereichssensoren

Anforderungen	Probleme
Flächendeckende Messung	Befahrbarkeit, Beobachtungsfläche, -volumen, (Zeit-)Aufwand
Schnell (On-line), am besten zusammen mit Applikation	Genauigkeit, Nachbearbeitung, Interpretation
Kostengünstig	Genauigkeit
Pflanzenbaulich relevante (interpretierbare) Parameter	Indirekte Messmethoden
Ungefährlich & einfach zu bedienen	Anzahl der Bodenparameter, Genauigkeit
Viele Parameter gleichzeitig	Sensorfusion ist anspruchsvoll
Daten $\neq$ Information	Dateninterpretation

Schlussfolgerungen

- Die sensorbasierte Kartierung kann räumlich hoch aufgelöste Informationen zu Bodeneigenschaften liefern
- **Schwierige Parameter: Biologie, Bodenchemie (PO₄), Bodenphysik (Steingehalt)**
- Sensordaten liefern meist indirekte Informationen → **schlagweise Kalibrierung** anhand von Laboranalysen
- Arbeitsaufwand für Kalibrierung hoch (Kartierung, Datenbereinigung, Referenzbeprobung und -analyse, Kalibrationsmodell)
- **Datenfusion** ist methodisch anspruchsvoll, kann Vorhersage teilweise deutlich verbessern
- **Wissenstransfer** braucht langen Atem und mehr Demonstrationsbetriebe
- **Nachweis der Wirtschaftlichkeit schwierig**: Ertragswirkung, Kosten

Kalibrierung

Kalibrierung (bei Relativ-Methoden): Intensität eines analytischen Signals wird zu der Signalintensität eines Standards in Beziehung gesetzt

- Meist Mathematische Erstellung der Kalibrierfunktion (Chemometrie):
Einfache Regression bis Machine Learning
- **Matrixunabhängige Kalibrierung**: Basiskalibrierung (Nullung),
Nutzung **künstlicher, genau definierter Standards** (Reinsubstanzen)
unter kontrollierten Bedingungen
- **Matrixabhängige Kalibrierung: Kalibrierung mit Realproben** unter
Berücksichtigung der Matrix.
 - **Matrixeffekt**: Wirkung der in der Probe enthaltenen
Begleitsubstanzen auf das Messsignal. Interferenzen:
Beeinflussung des Messsignals, sodass der Zusammenhang zur
Konzentration des Analyten nicht mehr eindeutig ist

Kalibrierung

Probleme durch Heterogenität der Probe und Messgeometrie des Sensors

Böden können kleinräumig variieren

Messgeometrie des Sensors

- Volumen
- Ausrichtung

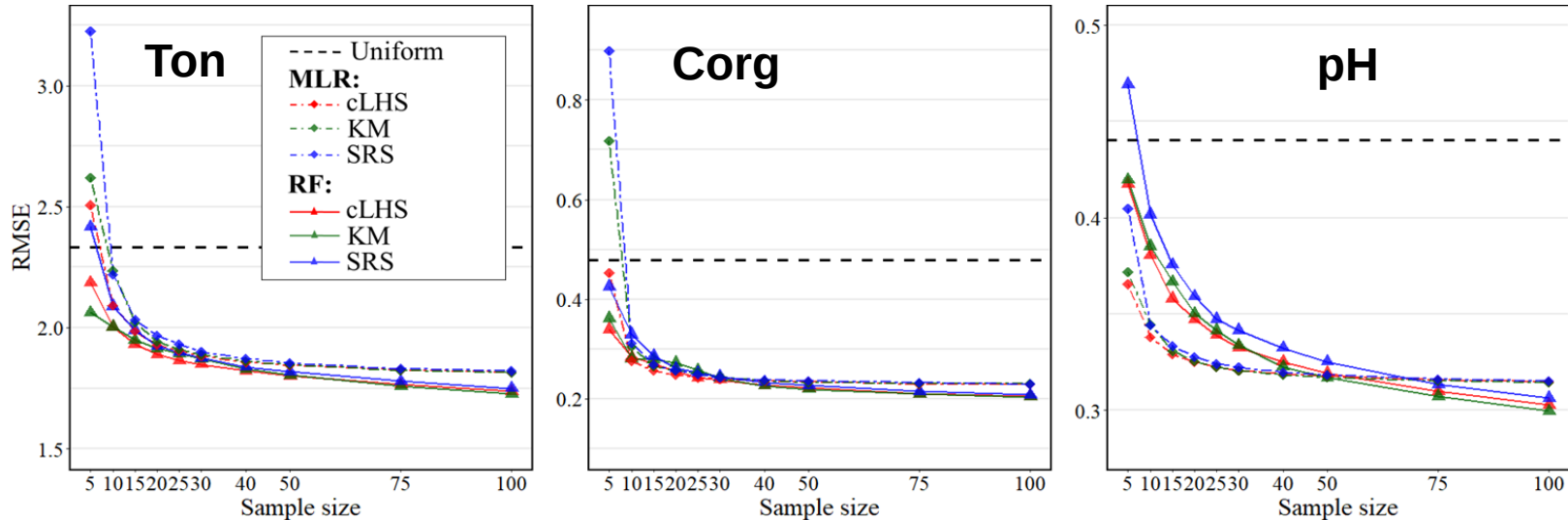
Untersuchtes Material bei der „Referenz“

- Ehebliche Variation zwischen leicht unterschiedlichen Einstichen und Laboren



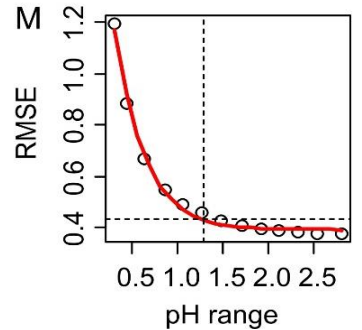
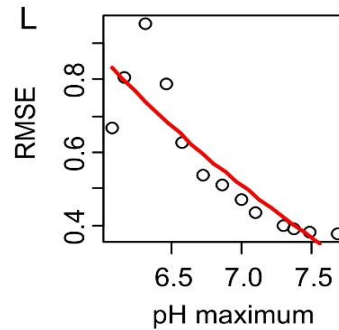
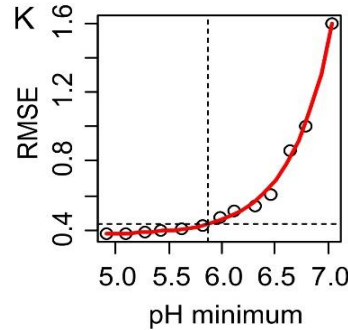
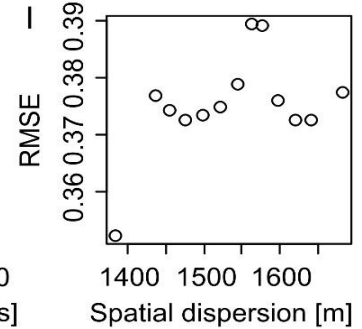
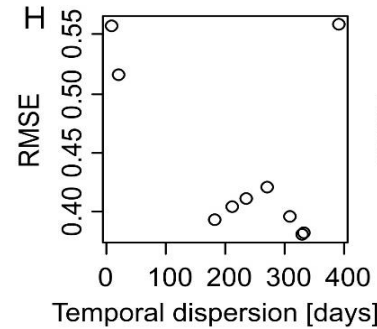
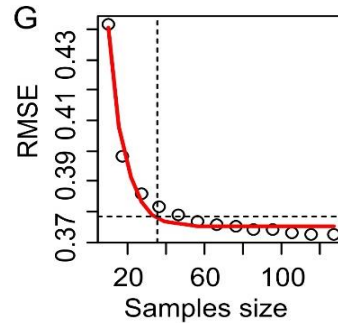
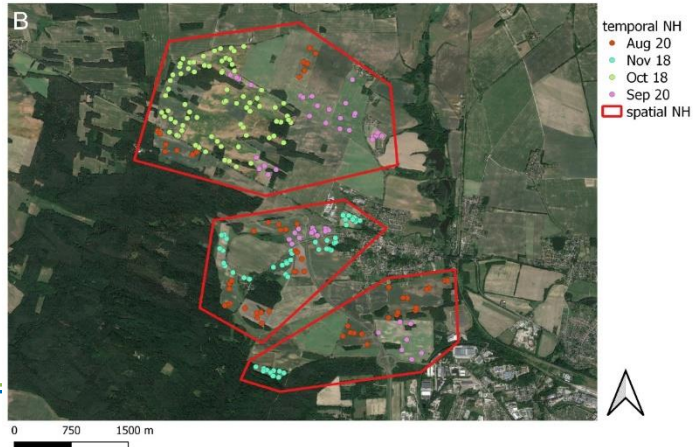
Einfluss der Zahl von Kalibrierproben und Probenwahl

Heterogener Schlag, diverse Sensoren



MLR: Multiple lineare Regresssion, RF: Random Forrest;
cLHS: conditional latin hypercube sampling; KM: k-means sampling; SRS: stratified random sampling Schmidinger et al. 2023

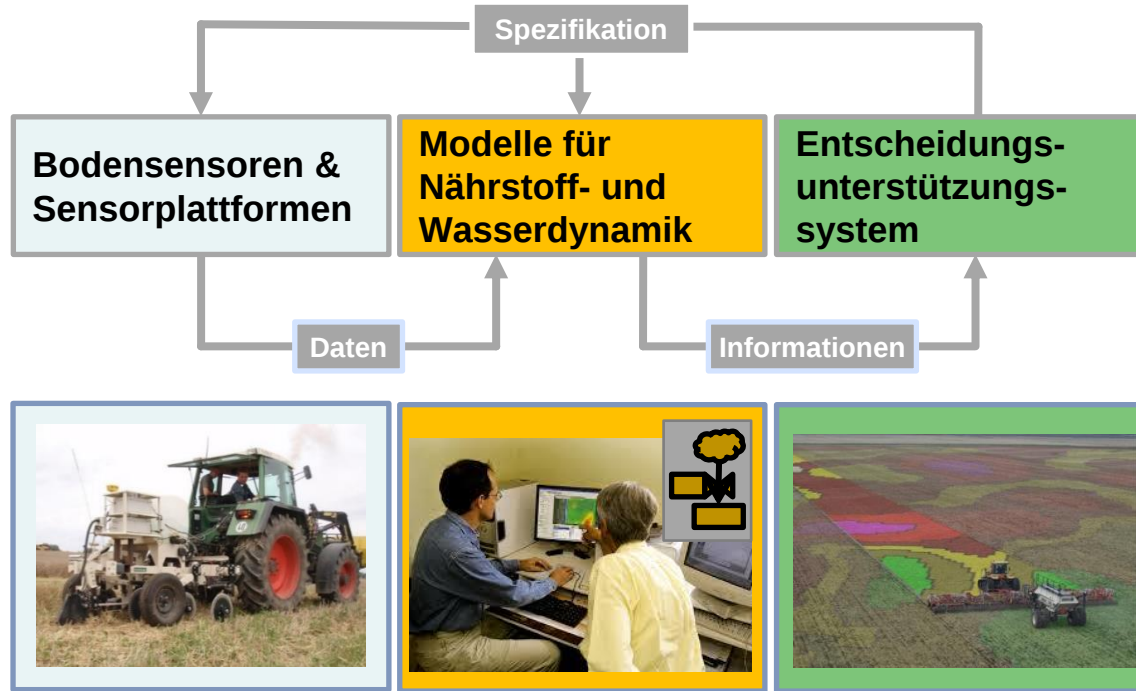
Weitere Einflüsse auf die Kalibrierung (pH)



Gebbers, M. 2023

Schlussfolgerungen

Integrierte Systeme erforderlich, die aus Sensordaten agronomisch relevante Informationen für den Landwirt generieren



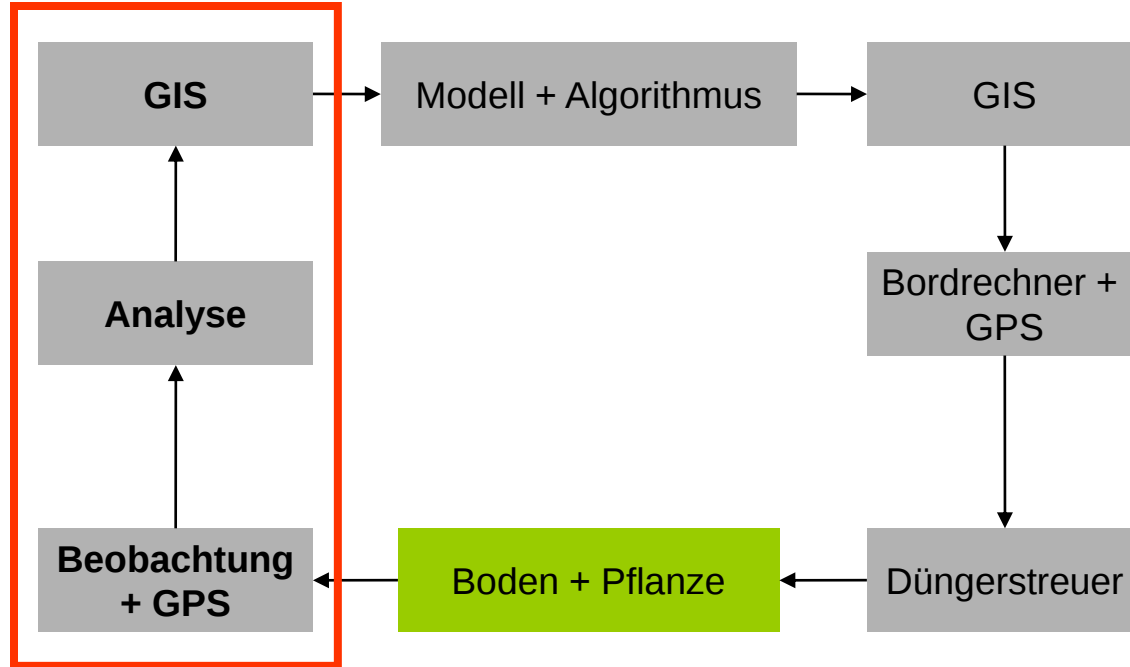
Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

Haben Sie Fragen?

rgebbers@atb-potsdam.de

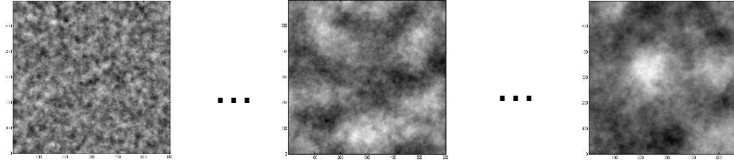


Fehleranalyse der Bodenkartierung

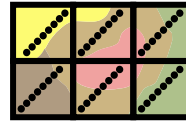


Fehleranalyse der Bodenkartierung: Faktoren

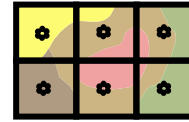
Räumliche Variabilität
(Variogramm-Reichweite
30, 60, ... , 180 m)



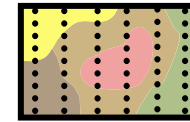
Probenahmedesign



Mischprobe diagonal



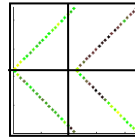
Mischprobe „Punkt“



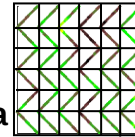
Massenbeprobung

Probenahmeabstand

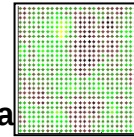
5 ha



1 ha

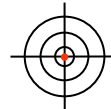


0.05 ha



GPS-Fehler

0 m

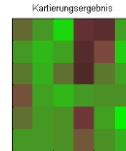


2 m

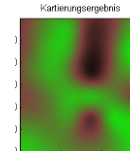


Regionalisierung

Attributierung



Interpolation



Analysefehler im Labor

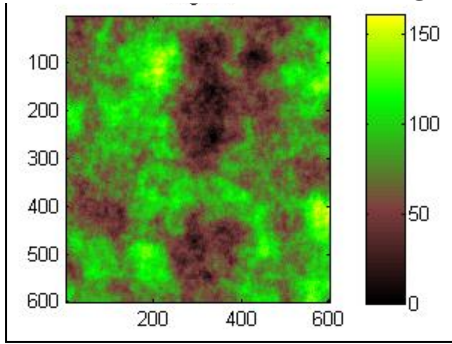
0 %

4 %

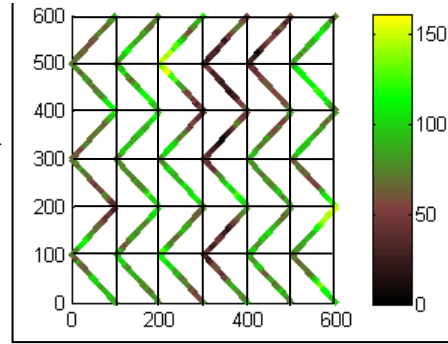
20 %

Fehleranalyse der Bodenkartierung: Simulation der Bodenkartierung

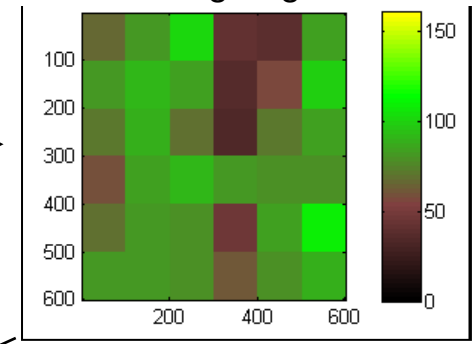
Reale Nährstoffverteilung



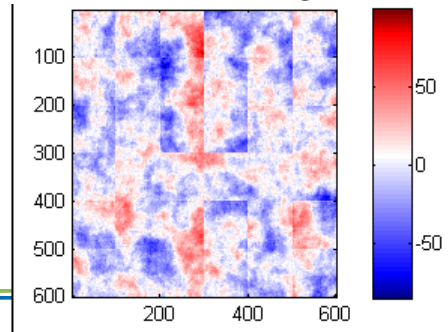
Beprobung



Kartierungsergebnis



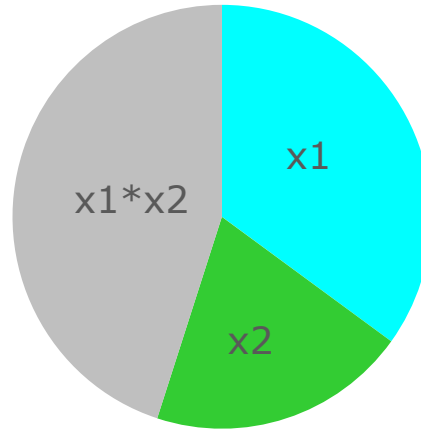
Differenz Kartierung - Realität



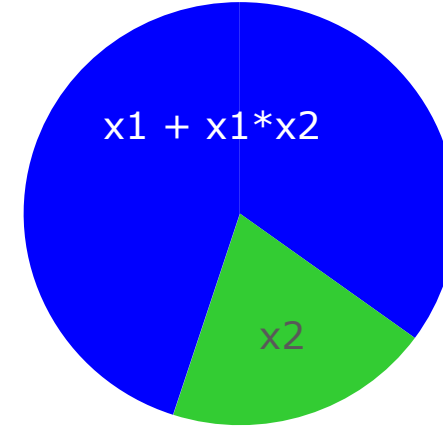
Sensitivitätseffekte: Bewertung der Einflüsse auf den Gesamtfehler

Einfaches Modellbeispiel:

$$y = x_1 + x_2 + x_1 x_2$$



-  Einzeleffekt x_1
-  Einzeleffekt x_2
-  Wechselwirkungseffekt $x_1 * x_2$

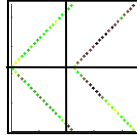


-  Gesamteffekt x_1

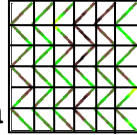
Fehleranalyse der Bodenkartierung: Sensitivitäten

Beprobungsabstand

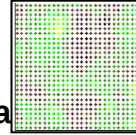
5 ha



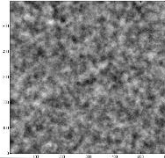
1 ha



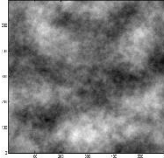
0.05 ha



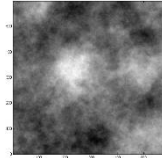
Räumliche Variabilität
(Variogramm-Reichweite
30, 60, ... , 180 m)



...

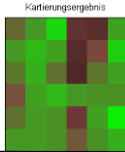


...

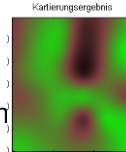


Regionalisierung

Attributierung



Interpolation



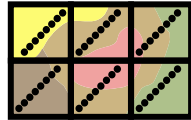
Analysefehler

0 %

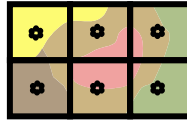
4 %

20 %

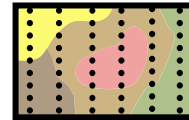
Probenahmedesign



Mischprobe diagonal



Mischprobe „Punkt“



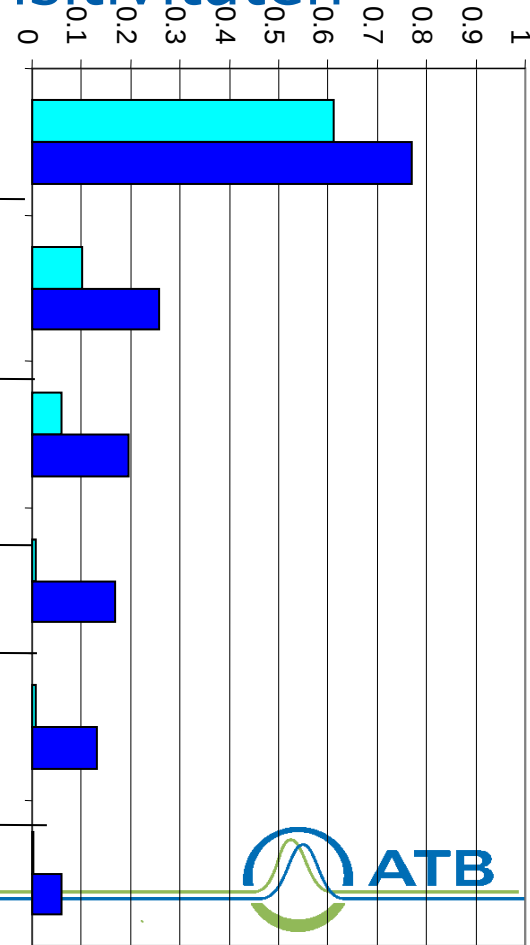
Massenbeprobung

GPS-Fehler

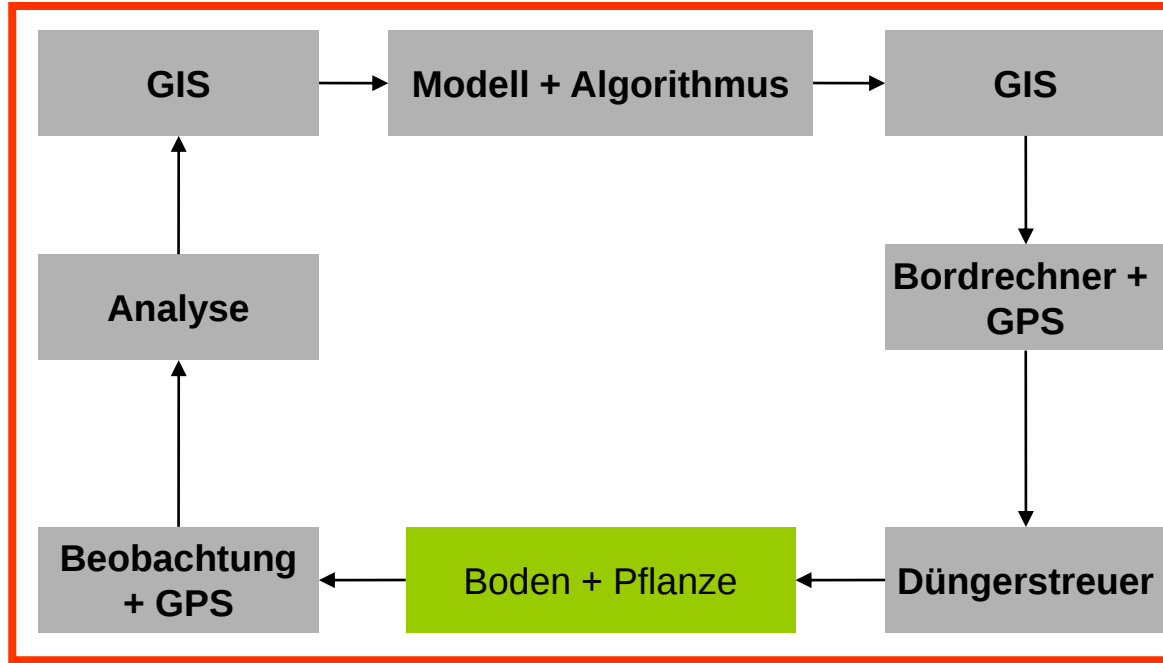
0 m



2 m

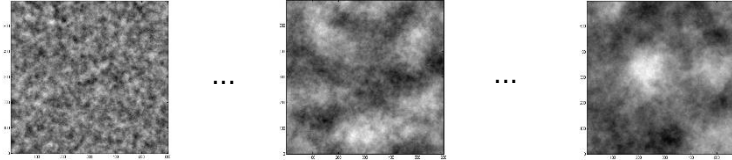


Fehleranalyse des Gesamtsystems

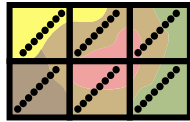


Fehleranalyse des Gesamtsystems: Faktoren

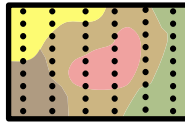
Räumliche Variabilität
(Variogramm-Reichweite
30, 60, 180 m)



Probenahmedesign

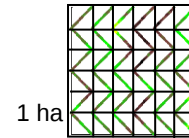


Mischprobe diagonal

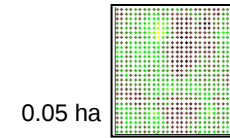


Massenbeprobung

Probenahmeabstand



1 ha

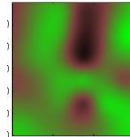


0.05 ha

Regionalisierung

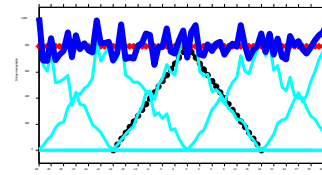


Attributierung

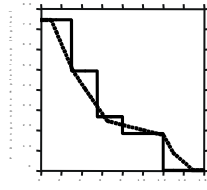


Interpolation

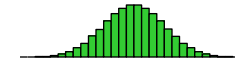
Streubild



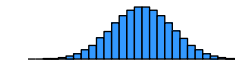
Algorithmus



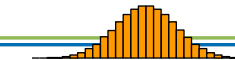
Fehler der Ertragsprognose



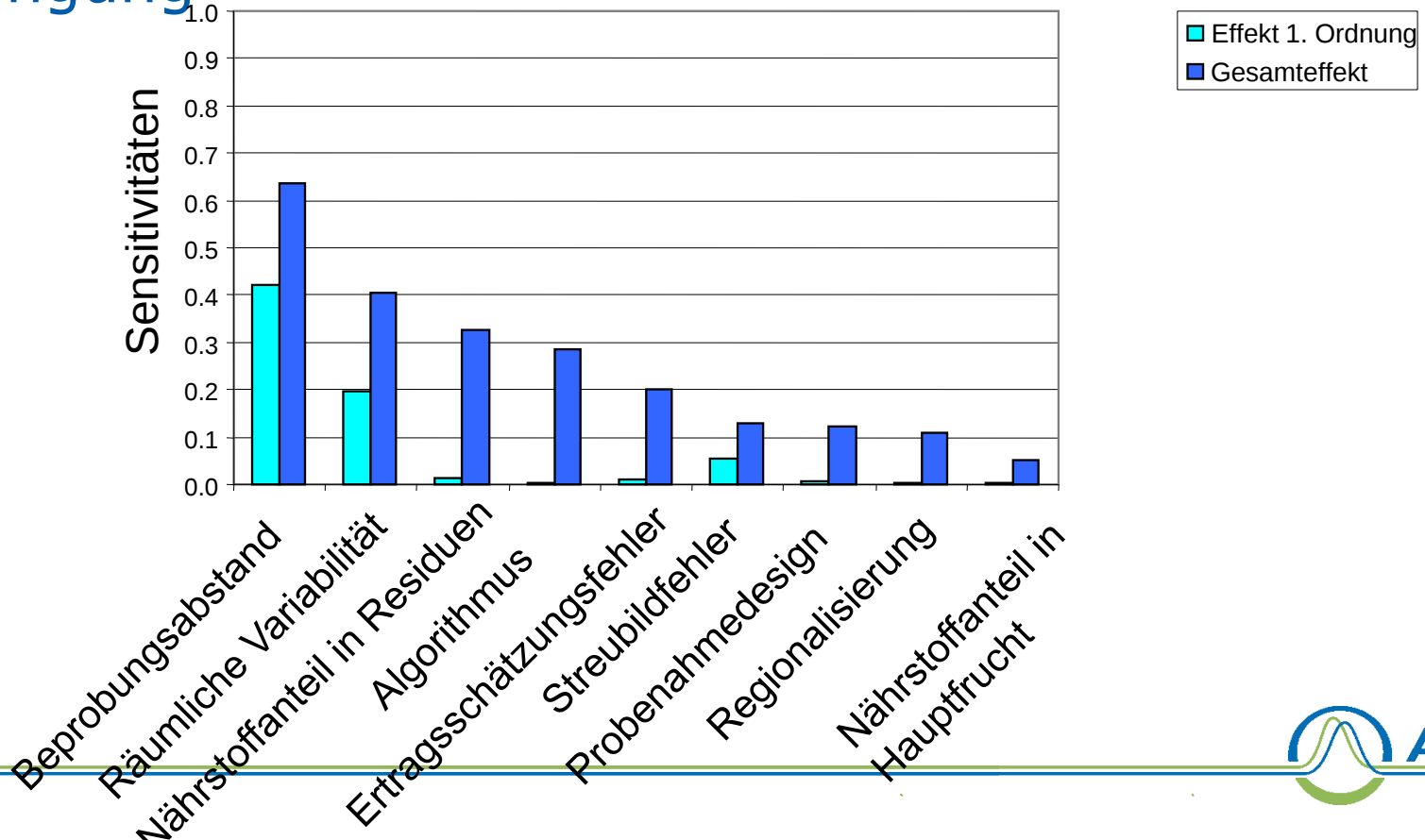
Nährstoffanteile in der Hauptfrucht



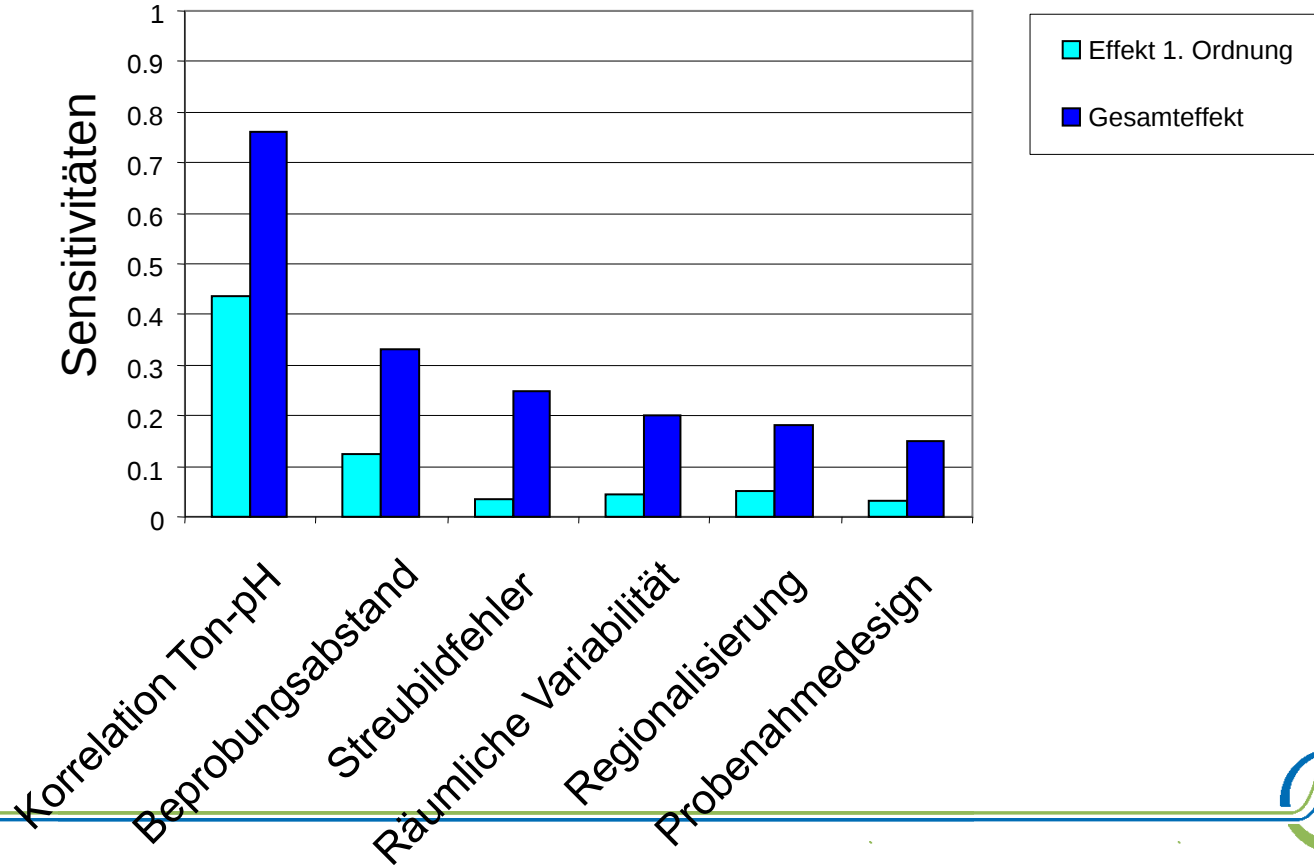
Nährstoffanteile in den Residuen



Fehleranalyse des Gesamtsystems: P-Düngung



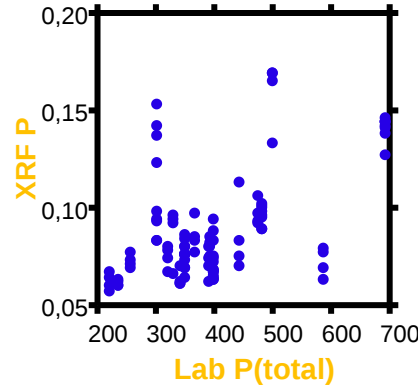
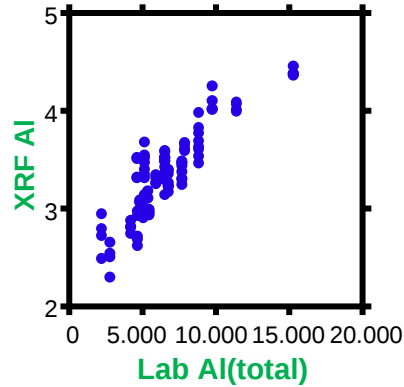
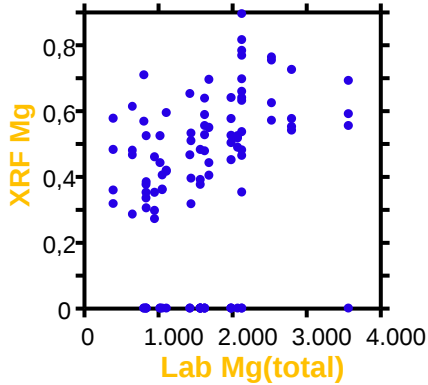
Fehleranalyse der Kalkdüngung



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



● Röntgenfluoreszenzanalyse (Elementgesamtgehalte)



Korrelation RFA vs.
Labordaten von Atomgewicht
und Konzentration abhängig

Ordnungszahl

Mg: 12

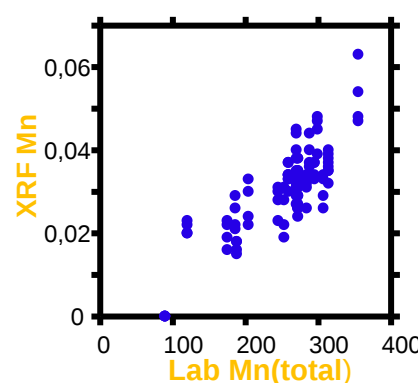
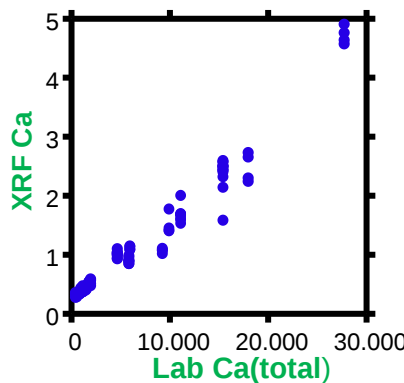
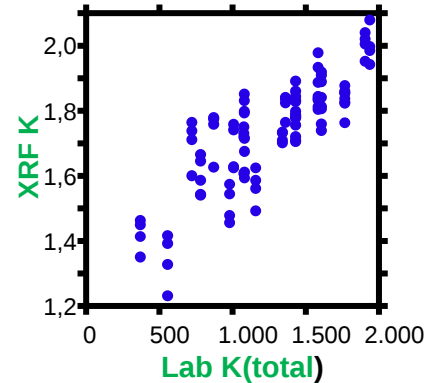
Al: 13

P: 15

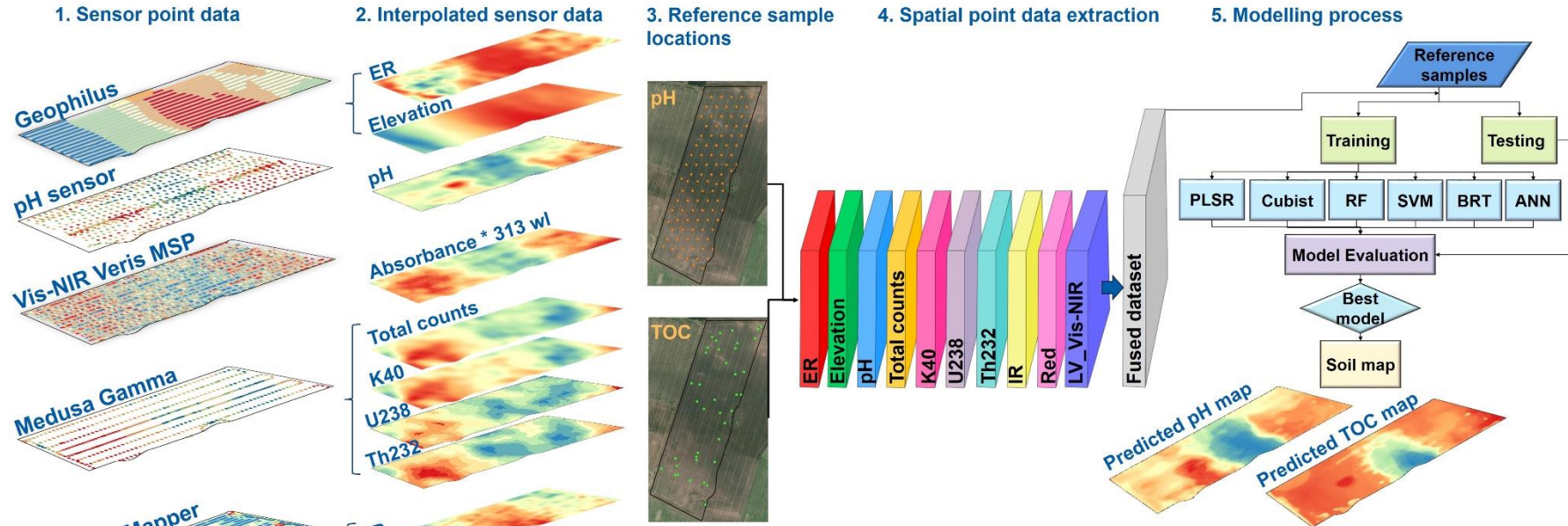
K: 19

Ca: 20

Mn: 25



5. Sensorfusion durch Multisensorplattformen



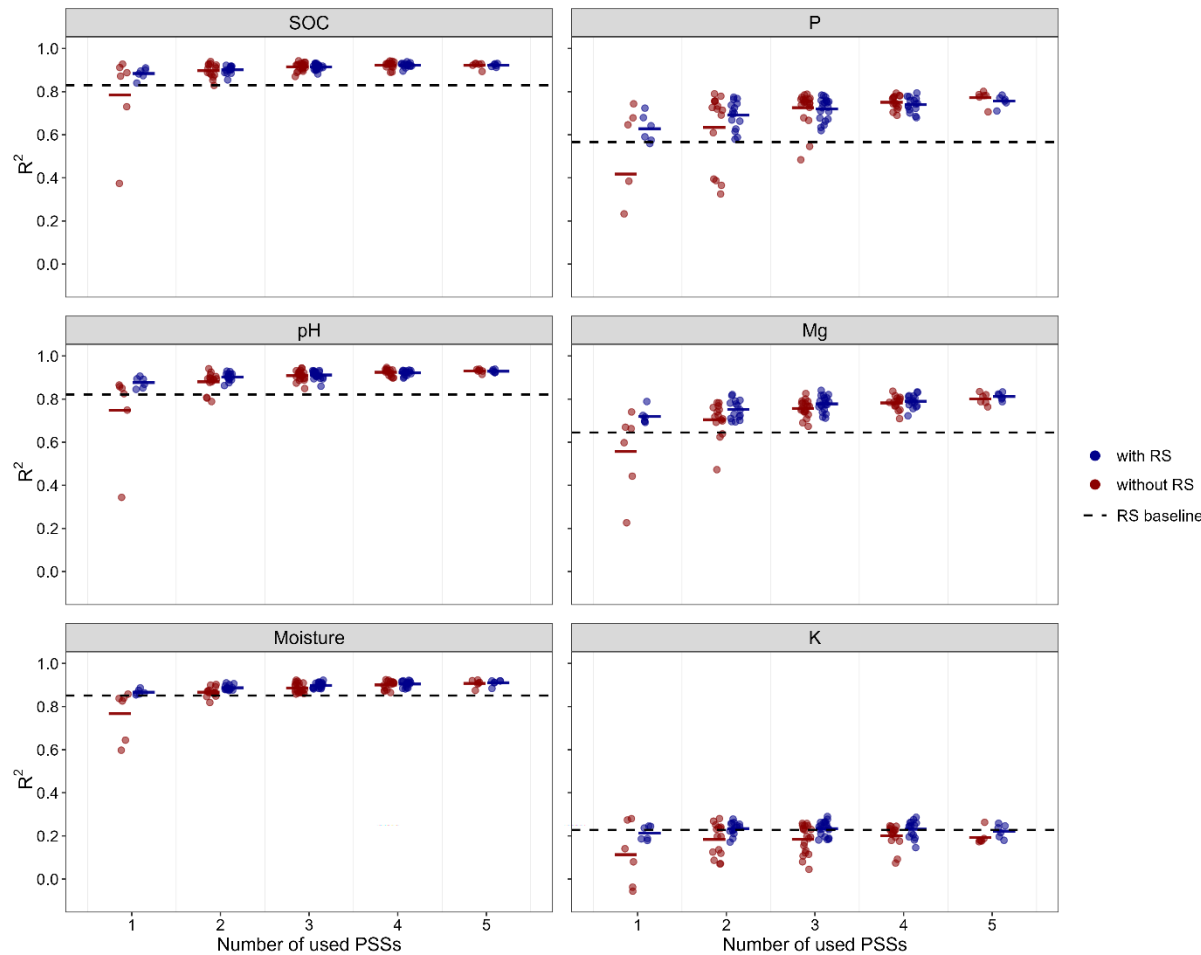


Fig. 3. Achieved R^2 of every PSS combination shown for the six target soil properties. It distinguishes between PSS combinations which fused RS data (blue) and those without RS data (red). The RS-baseline corresponds to the achieved performance when solely using RS data.