

Teilflächenspezifische Düngung durch sensorbasierte Bodenkartierung

Dr. rer. nat. Sebastian Vogel

Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V.

Abteilung Technik im Pflanzenbau

Leiter Arbeitsgruppe „Proximal Soil Sensing“

Leiter Forschungsbereich „Soil Health“

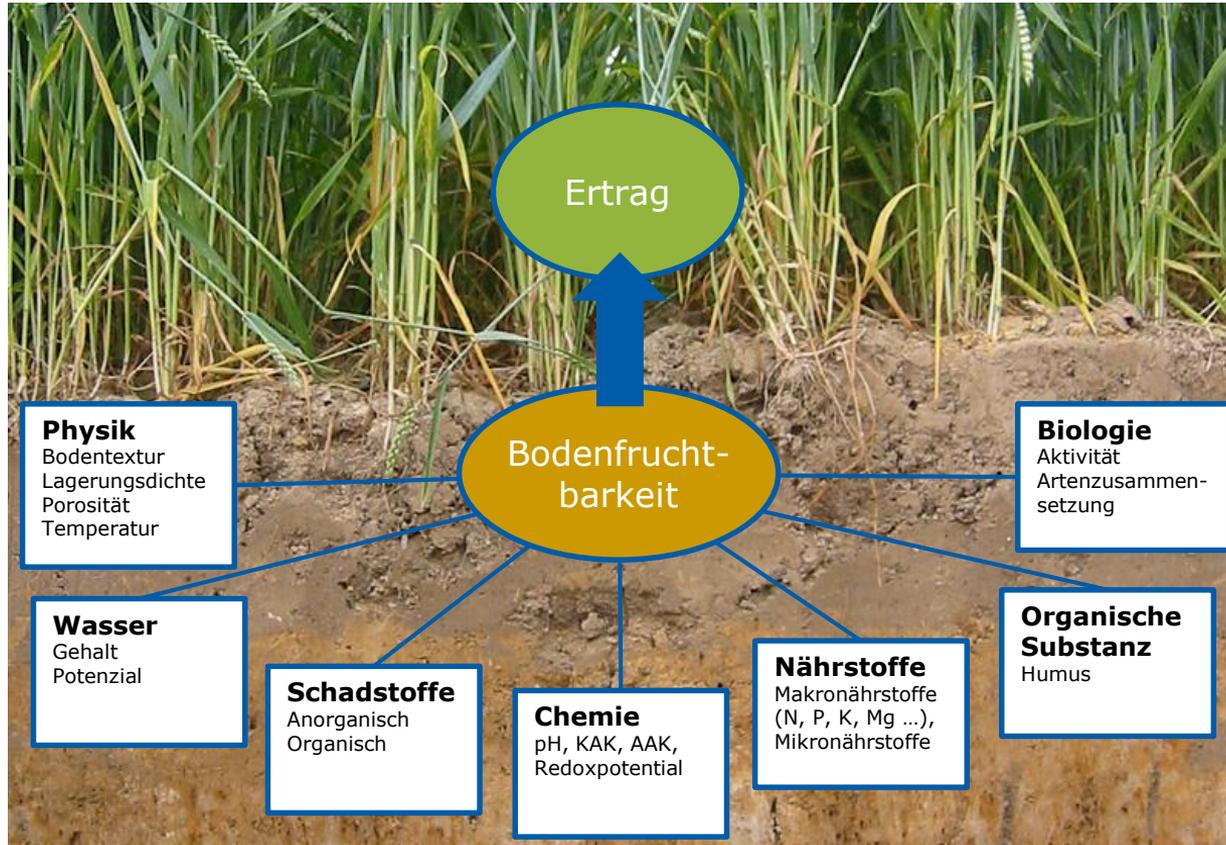
Gliederung

- 1. Bodenfruchtbarkeit
- 2. Warum sensorbasierte Bodenkartierung?
- 3. Überblick über verschiedene Messprinzipien
- 4. Sensorfusion durch Multisensorplattformen
- 5. Schlussfolgerungen

1. Bodenfruchtbarkeit

- Bodenfruchtbarkeit ist die **nachhaltige Fähigkeit** eines Bodens **hohe Pflanzenerträge** zu liefern
- Konflikt:
 - **Zunehmende Nachfrage** an Nahrung, Futter, Rohstoffe
 - **Verlust fruchtbarer Böden** durch andere Nutzungen
 - Fortschreitende **Bodendegradation**
- Fazit: Bodenfruchtbarkeit muss **erhalten und vermehrt** werden

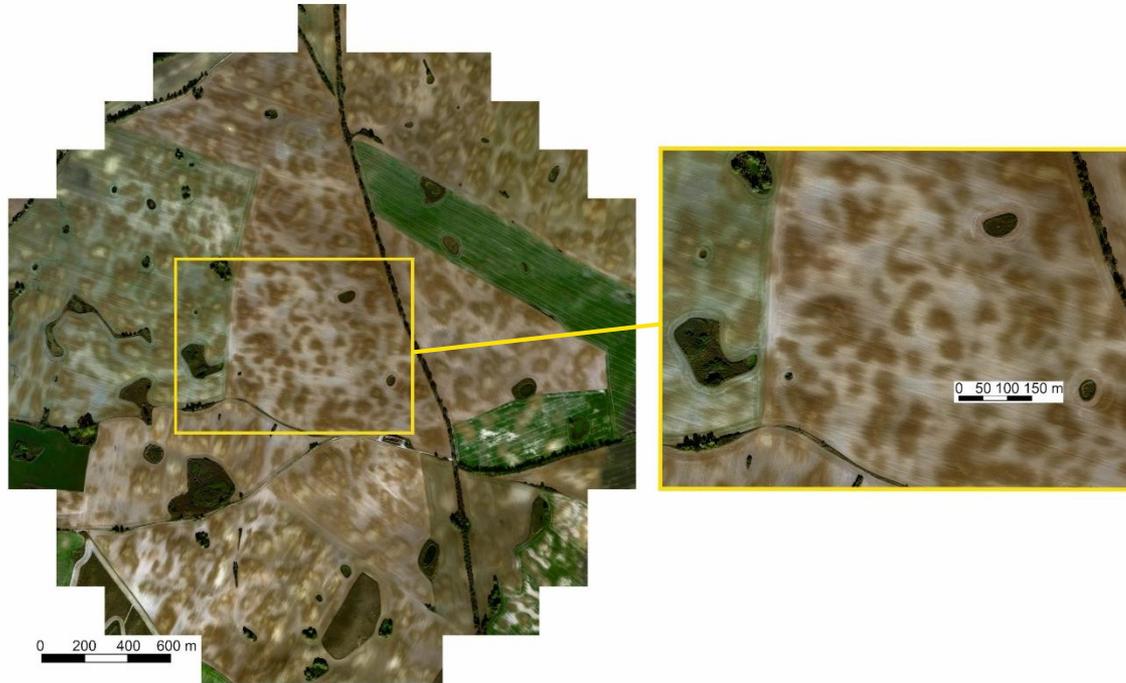
1. Bodenfruchtbarkeit



Gebbers, R.

2. Warum sensorbasierte Bodenkartierung?

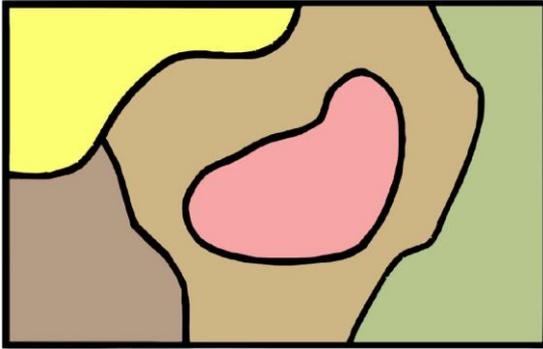
- Natürliche und vom Menschen gemachte Bodenvariabilität



Luftbild einer ackerbaulich genutzten Region in Brandenburg (Quelle: © 2018 DigitalGlobe).

2. Warum sensorbasierte Bodenkartierung?

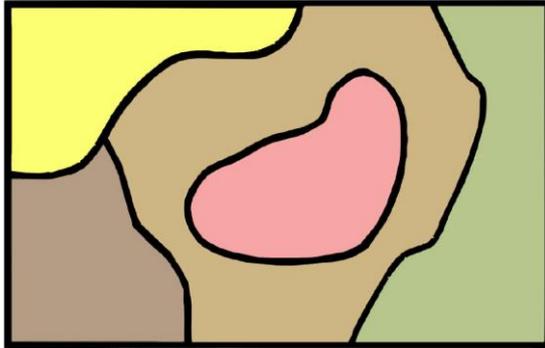
- Mischproben versus Rasterbeprobung



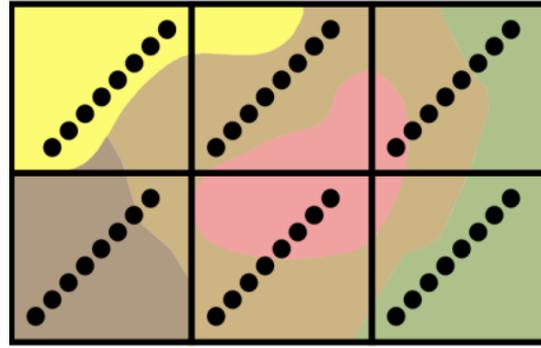
Tatsächliche räumliche
Struktur eines Schlages

2. Warum sensorbasierte Bodenkartierung?

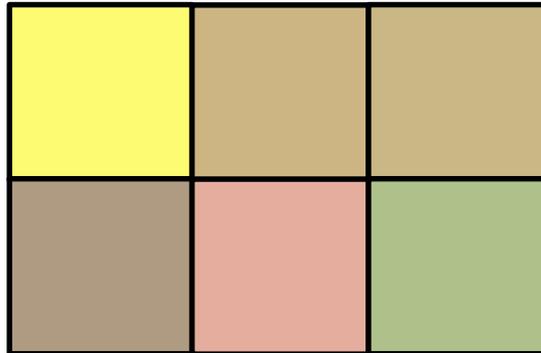
● Mischproben versus Rasterbeprobung



Tatsächliche räumliche Struktur eines Schlages

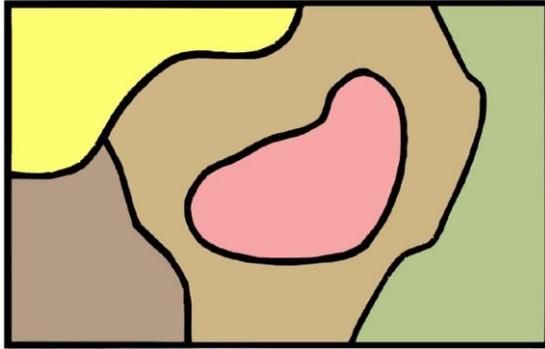


6 Mischproben

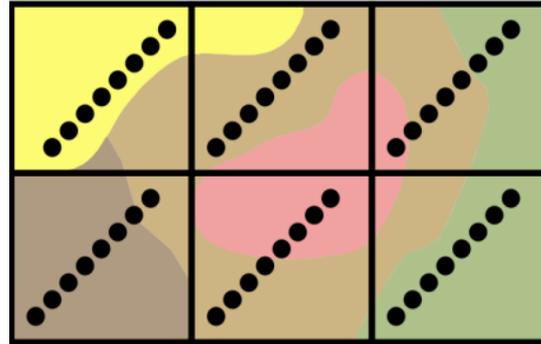


2. Warum sensorbasierte Bodenkartierung?

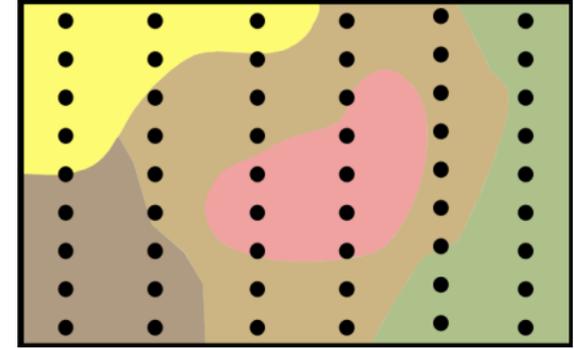
● Mischproben versus Rasterbeprobung



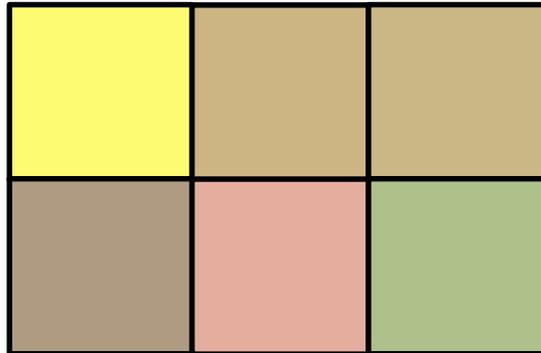
Tatsächliche räumliche Struktur eines Schlages



6 Mischproben



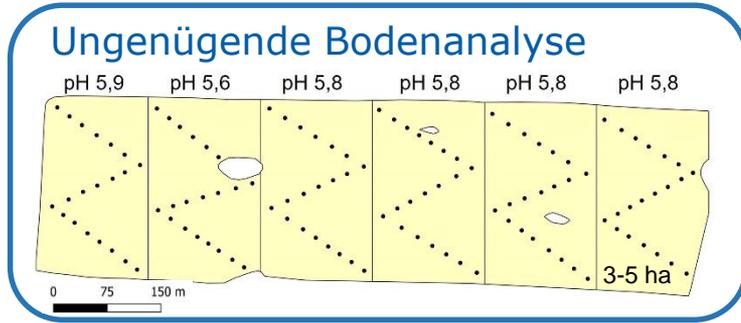
54 Einzelproben



Standardlaboranalysen zu teuer und zeitintensiv

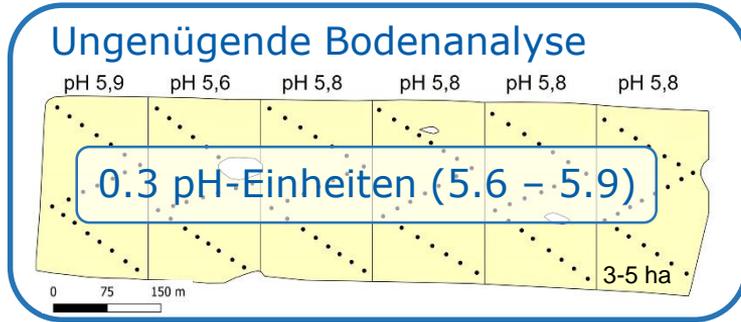
2. Warum sensorbasierte Bodenkartierung?

- Gegenwärtige Düngepraxis (Bsp. pH-Management)



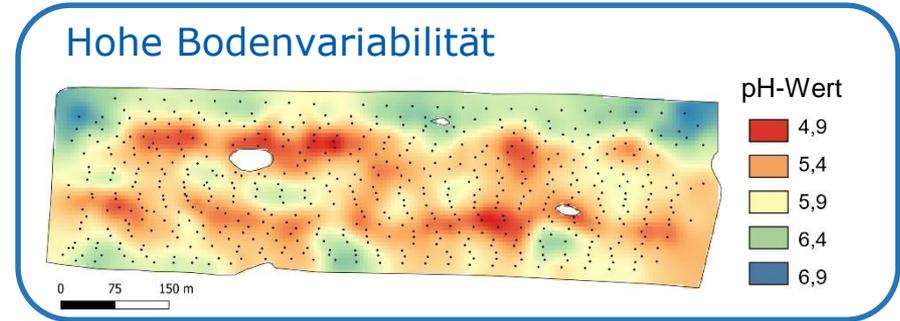
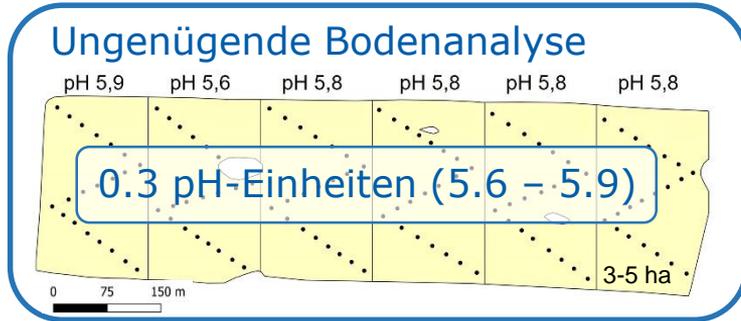
2. Warum sensorbasierte Bodenkartierung?

- Gegenwärtige Düngepraxis (Bsp. pH-Management)



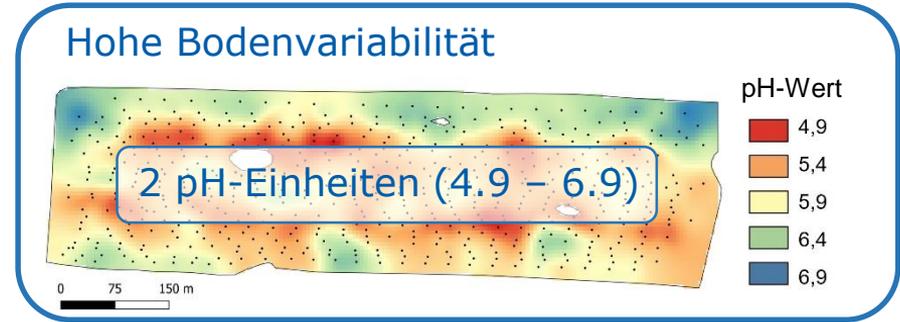
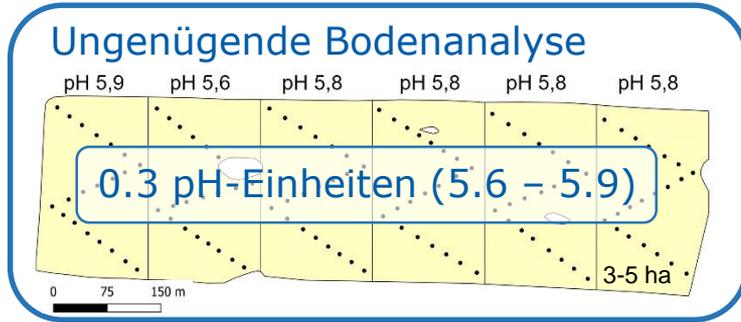
2. Warum sensorbasierte Bodenkartierung?

- Gegenwärtige Düngepraxis (Bsp. pH-Management)



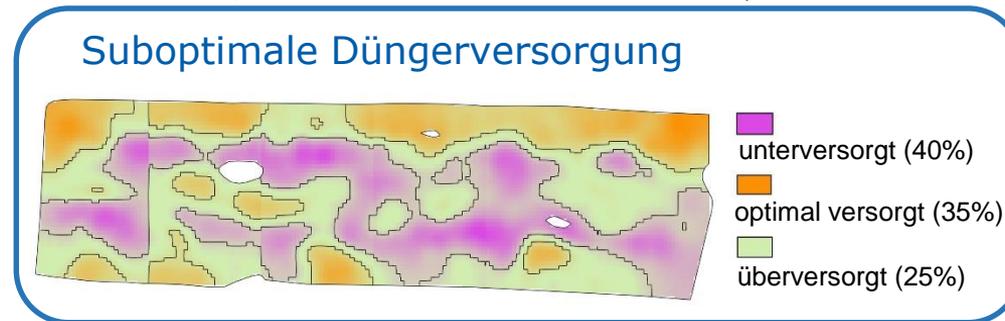
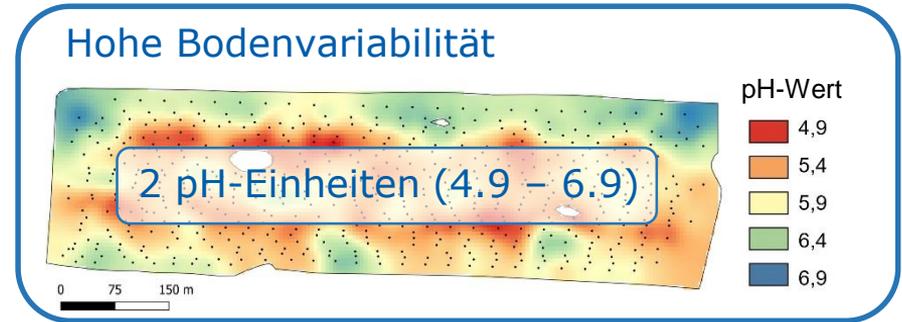
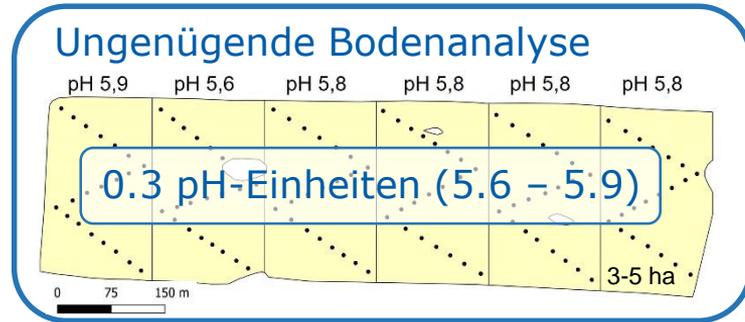
2. Warum sensorbasierte Bodenkartierung?

- Gegenwärtige Düngepraxis (Bsp. pH-Management)



2. Warum sensorbasierte Bodenkartierung?

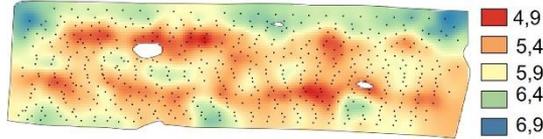
● Gegenwärtige Düngepraxis (Bsp. pH-Management)



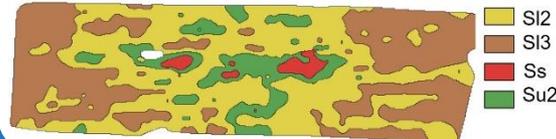
2. Warum sensorbasierte Bodenkartierung?

● Sensor-basierte Kalkbedarfsermittlung

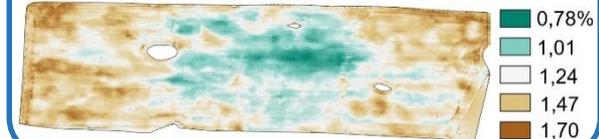
pH-Wert



Bodentextur

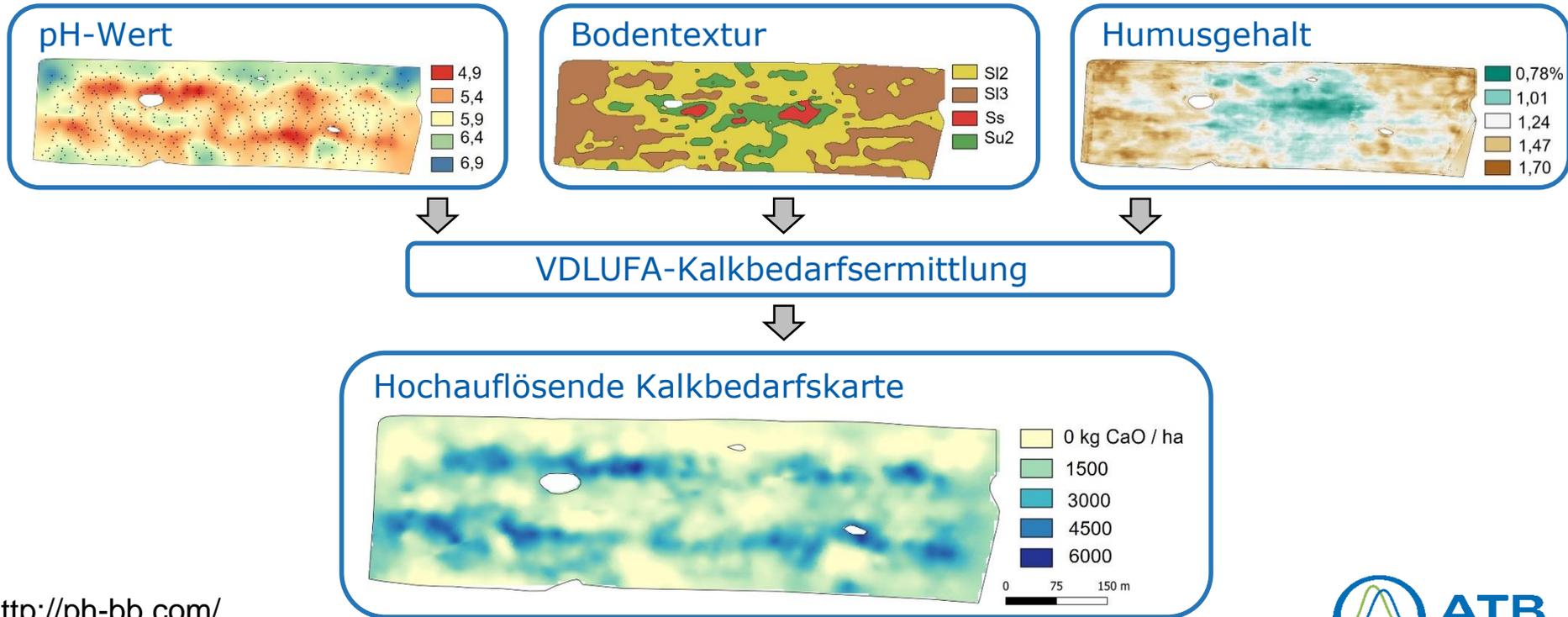


Humusgehalt



2. Warum sensorbasierte Bodenkartierung?

● Sensor-basierte Kalkbedarfsermittlung

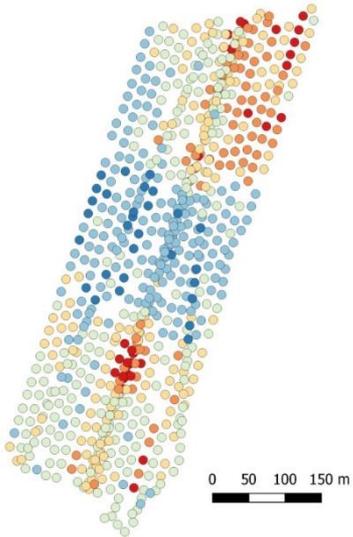


2. Warum sensorbasierte Bodenkartierung?



- Viele Sensordaten & wenige Labordaten (die Mischung macht's!)

Schritt 1:
Sensorkartierung



<http://ph-bb.com/>

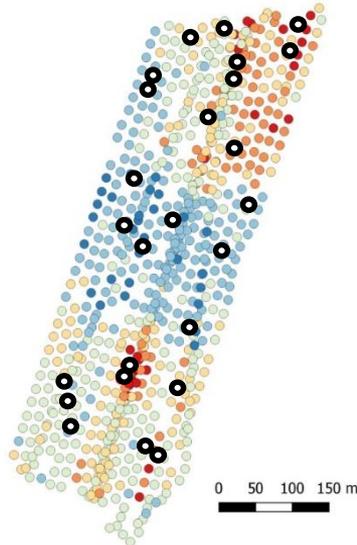
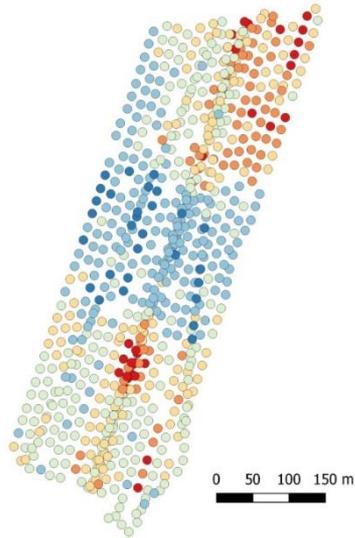
2. Warum sensorbasierte Bodenkartierung?

- Viele Sensordaten & wenige Labordaten (die Mischung macht's!)

Schritt 1:
Sensorkartierung



Schritt 2:
Referenzbeprobung
& Laboranalyse



2. Warum sensorbasierte Bodenkartierung?

- Viele Sensordaten & wenige Labordaten (die Mischung macht's!)

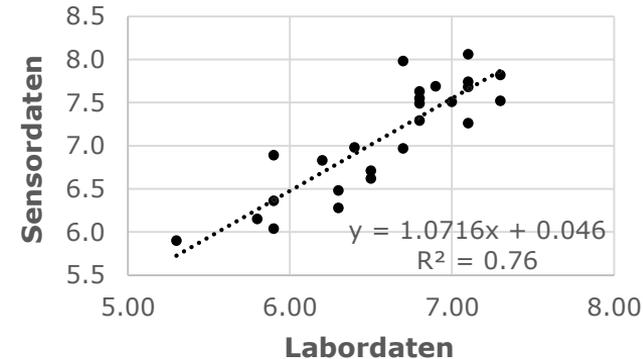
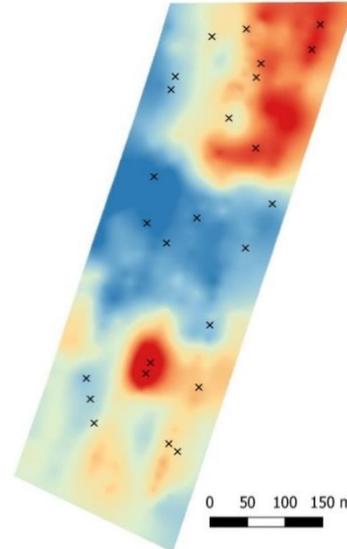
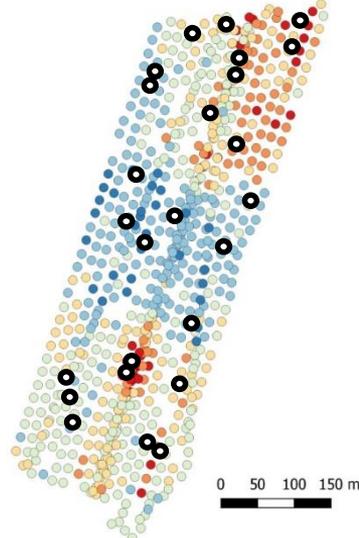
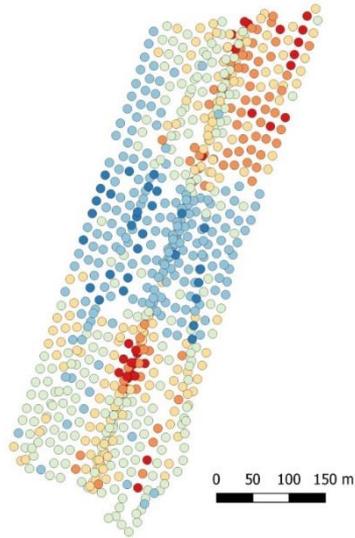
Schritt 1:
Sensorkartierung



Schritt 2:
Referenzbeprobung
& Laboranalyse



Schritt 3:
Modellbildung, Kalibrierung
& Interpolation



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien

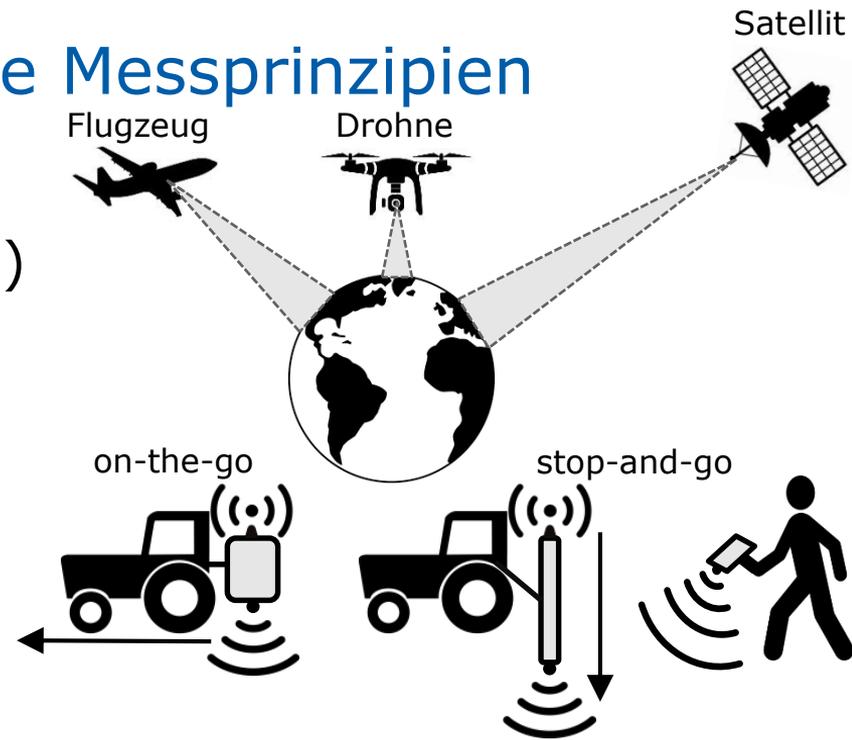
- Fernerkundung, luftgestützt
(Satellit, Flugzeug, Drohne [1–100m])



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien

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

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

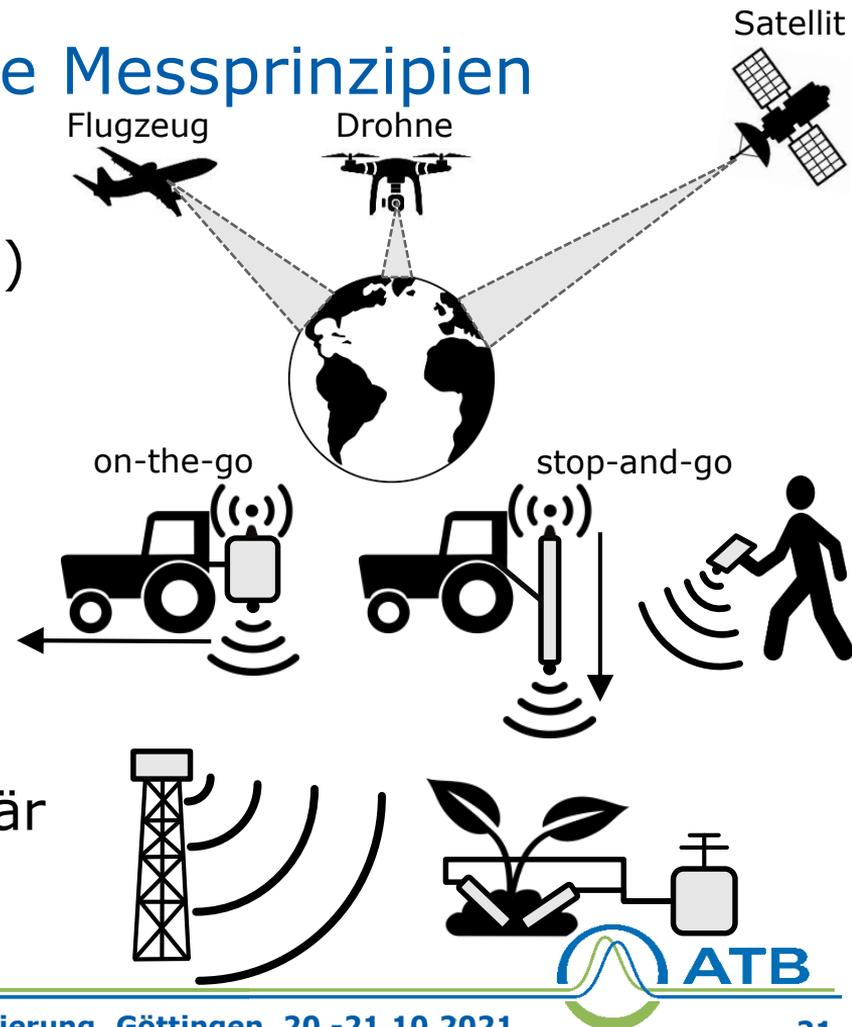


3. Überblick über verschiedene Messprinzipien

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

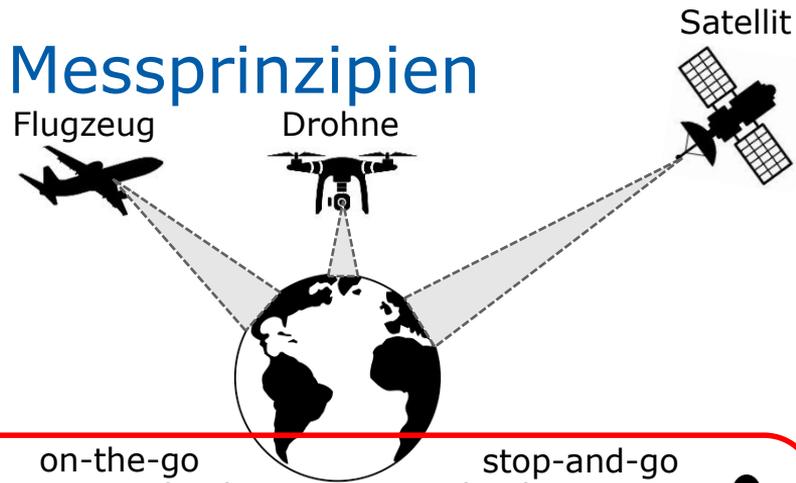
● Nahbereich, bodengestützt, mobil
(on-the-go, stop-and-go)

● Nahbereich, bodengestützt, stationär
(Dauerbeobachtung im Boden)



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien

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



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

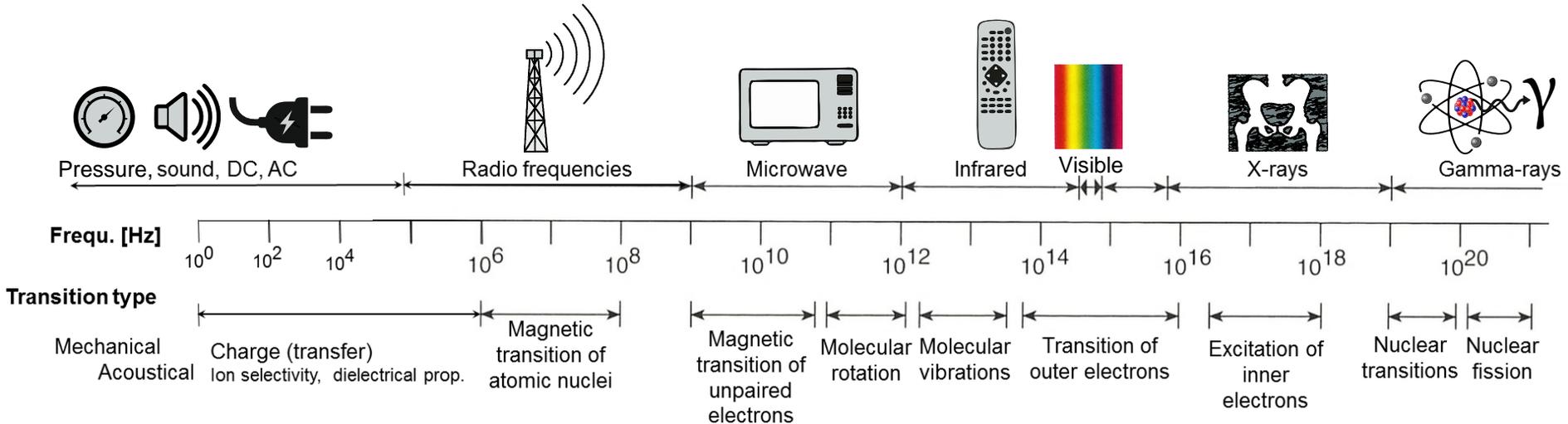


- Nahbereich, bodengestützt, stationär
(Dauerbeobachtung im Boden)



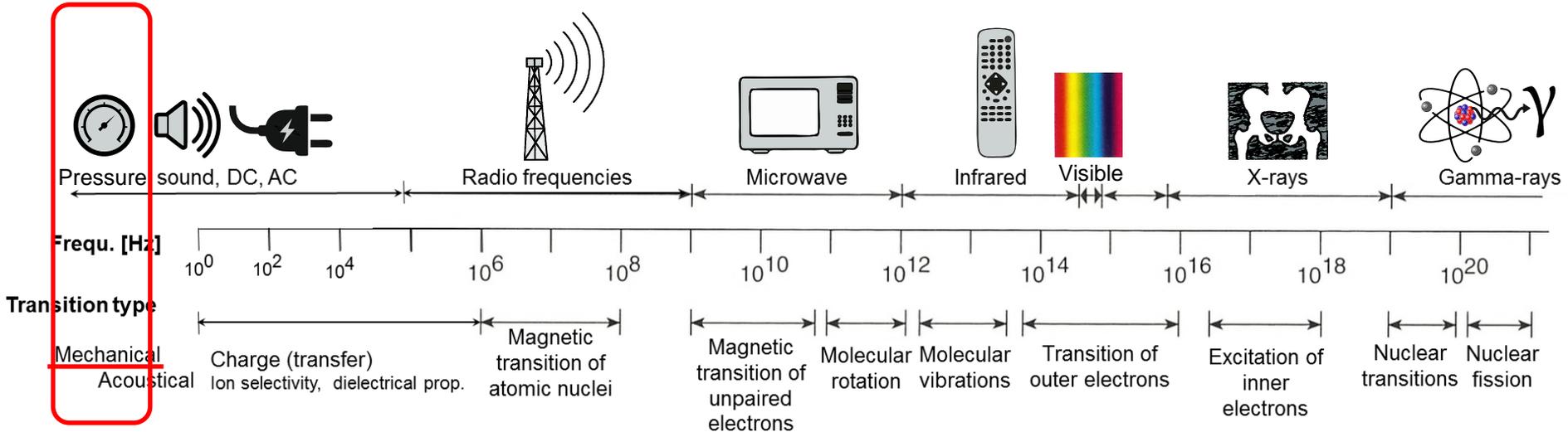
3. Überblick über verschiedene Messprinzipien

● Elektromagnetisches Wellenspektrum



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien

● Elektromagnetisches Wellenspektrum



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



- Penetrometer (Lagerungsdichte, Texturwechsel)



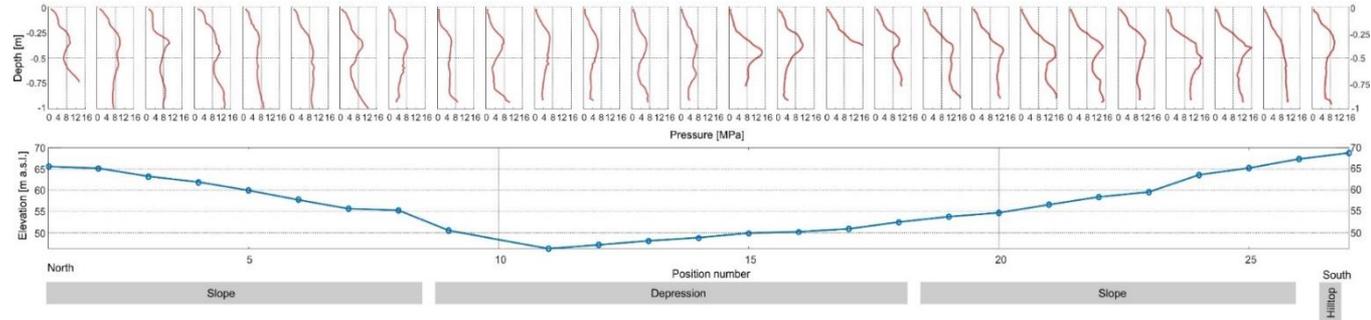
<https://de.eijkelkamp.com/>



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



● Penetrometer (Lagerungsdichte, Texturwechsel): Veris P4000



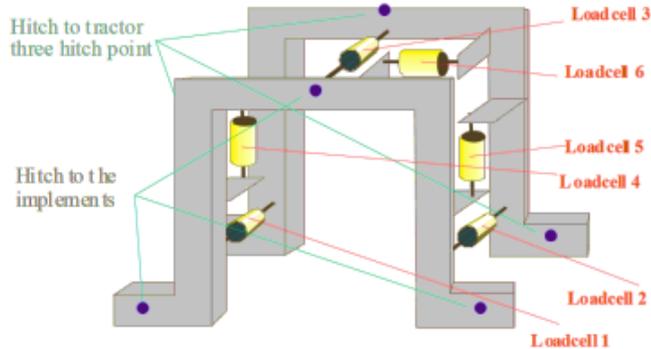
<https://veristech.com/>



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien

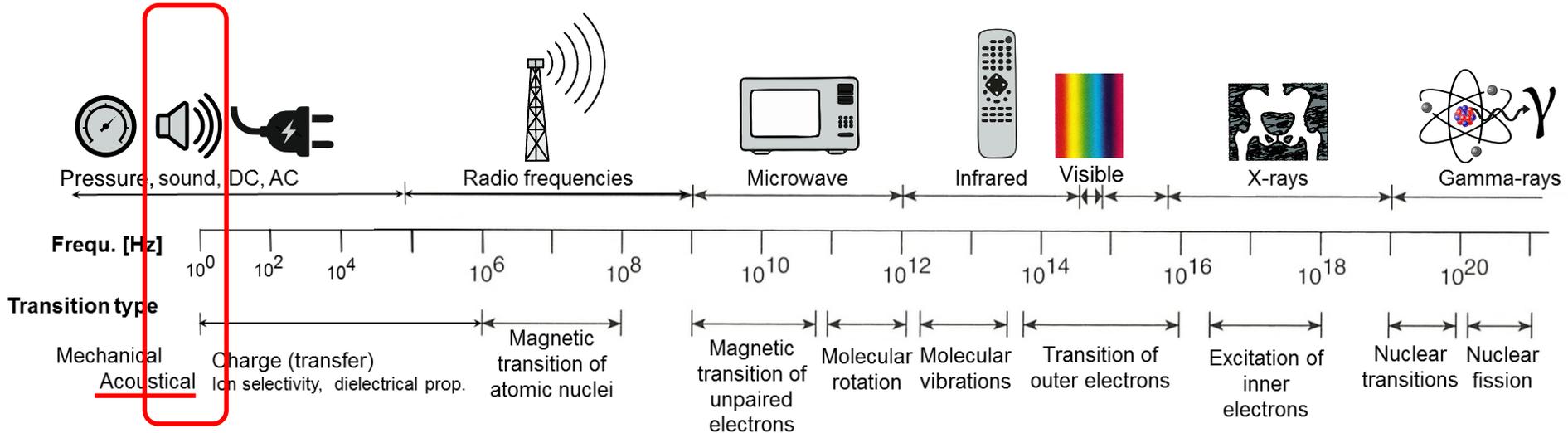


● Zugkraftsensoren (Lagerungsdichte, Texturwechsel)



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien

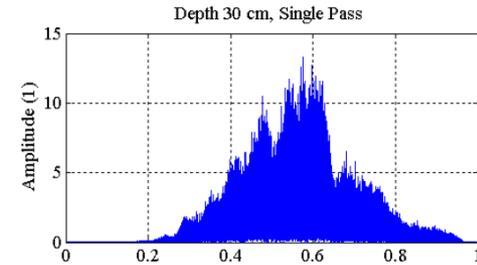
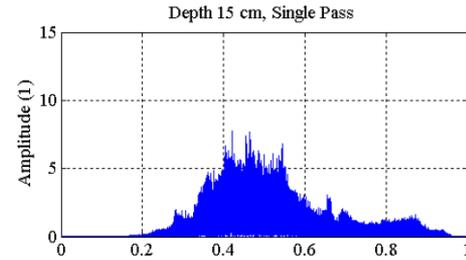
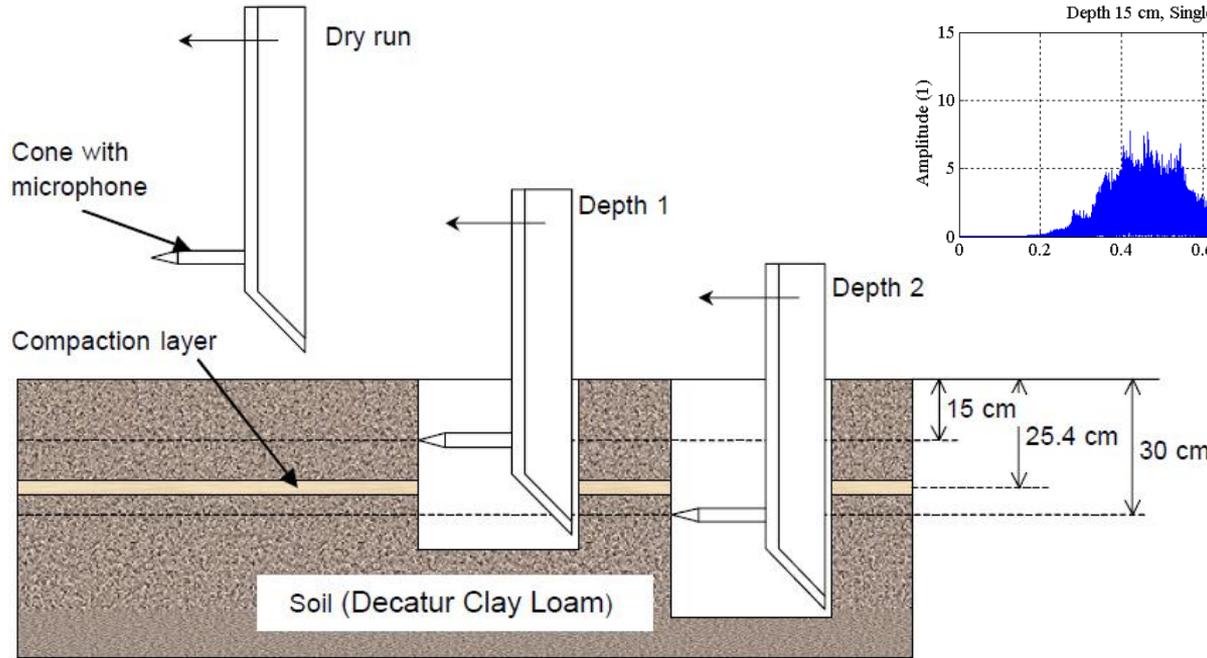
● Elektromagnetisches Wellenspektrum



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



● Akustik: Steingehalt, Bodentextur, Bodenstruktur

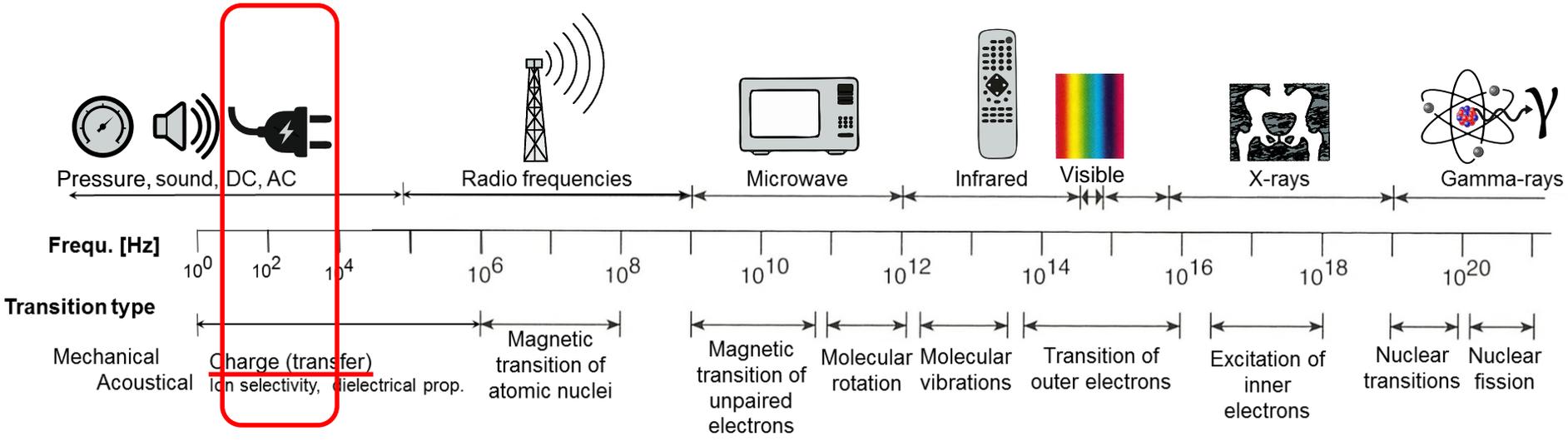


Grift et al. 2005

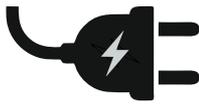


3. Überblick über verschiedene Messprinzipien

● Elektromagnetisches Wellenspektrum



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



● Geoelektrik (Textur, Wassergehalt ...): Ladungstransport im Boden

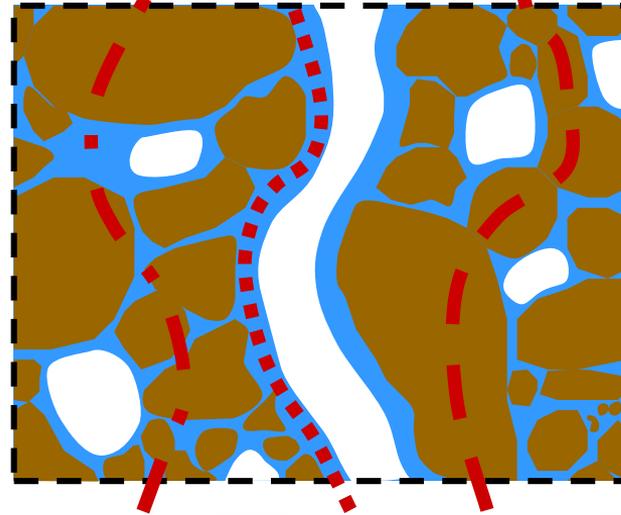
GCR



Phasengemisch

Wässrige Phase
elektrolytische Leitung

Feste Phase
(metallische Leitung)



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

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

Widerstand:
 $\Omega \cdot m$

■ Wasser ■ Festsubstanz □ Luft

EMI



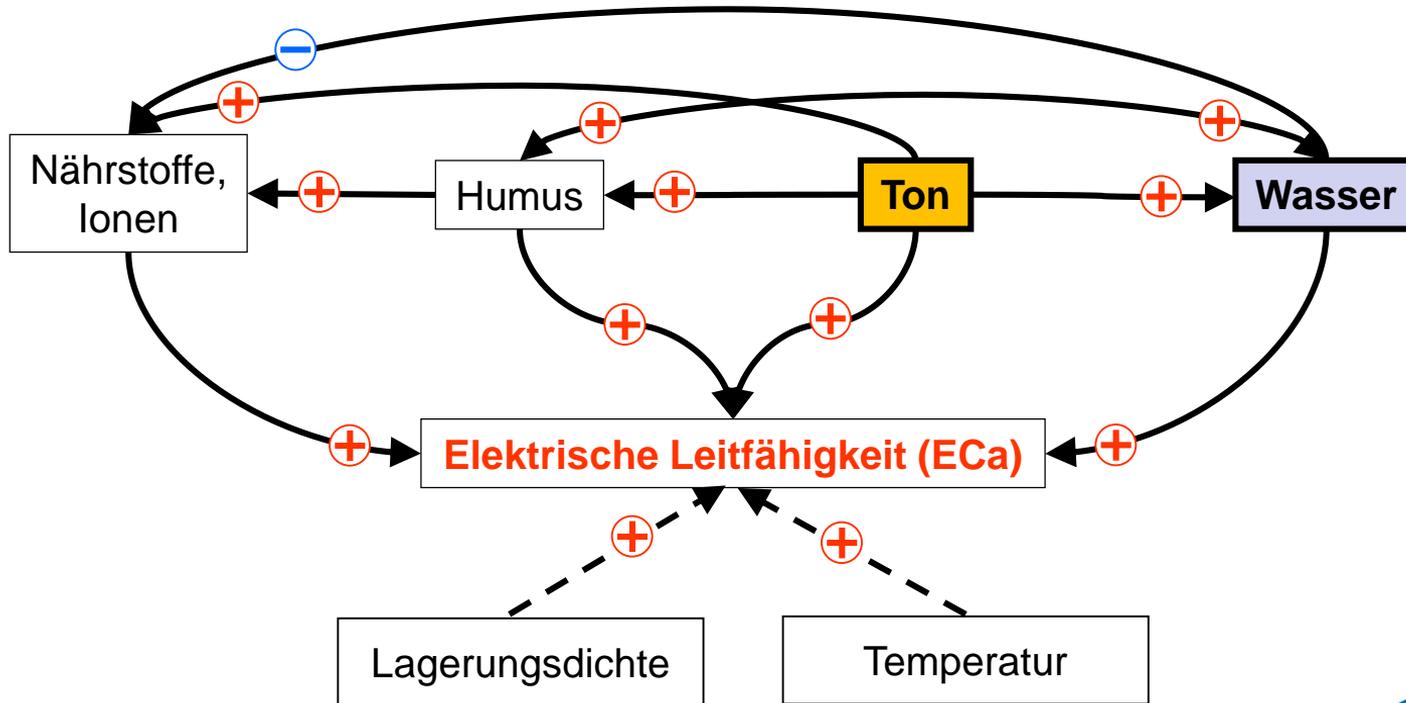
Gebbers et al. 2009



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



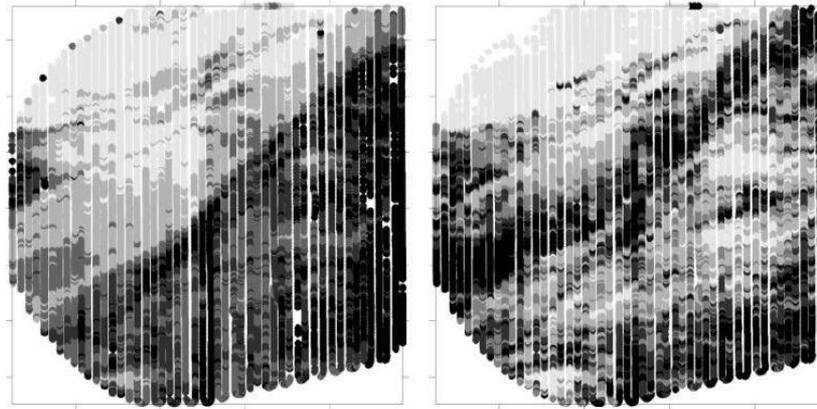
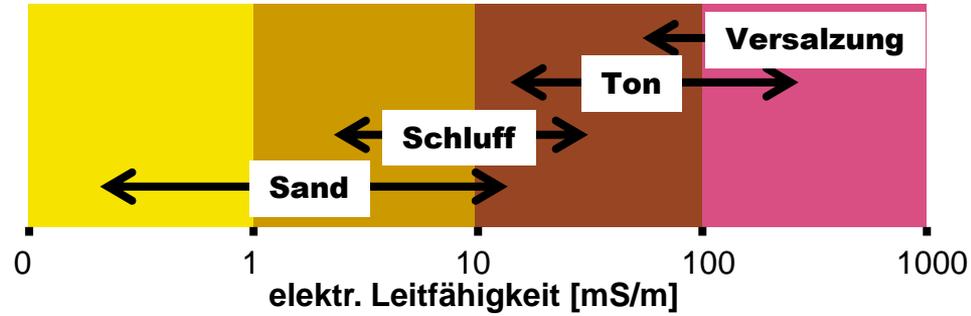
- Geoelektrik (Textur, Wassergehalt ...): **Summenparameter**



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



● Veris Q2800



Shallow EC

Deep EC

↑ finer
Texture
↓ coarser



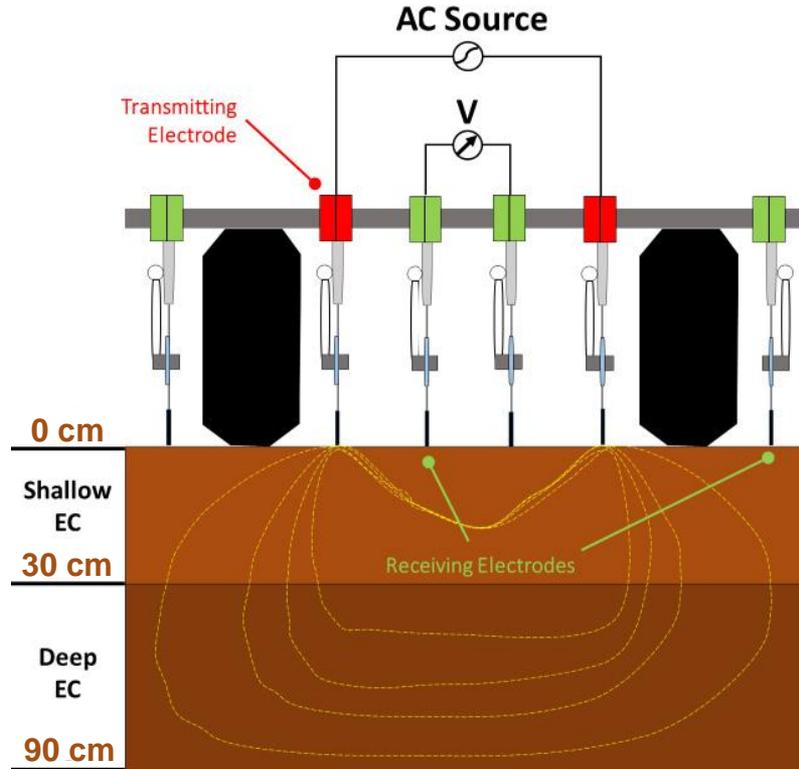
<https://veristech.com/>



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



● Veris Q2800: Messprinzip



<https://veristech.com/>

Hawkins et al. 2017

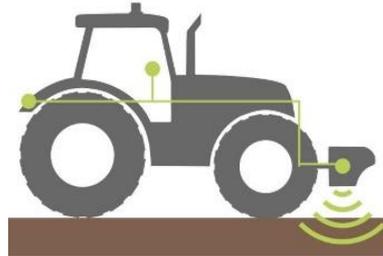
90 cm



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien

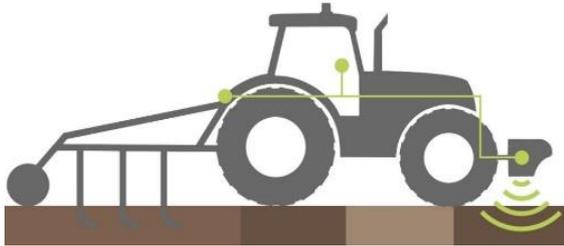


● TopsoilMapper (Geoprospectors): Elektromagnetische Induktion

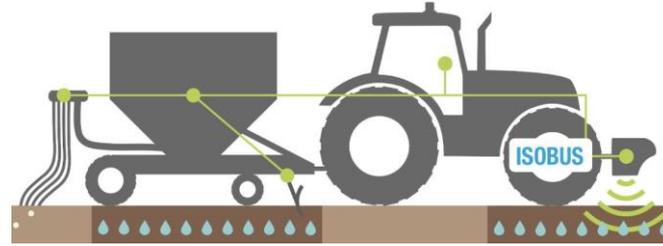


- Berührungslose ECa-Messung durch elektromagnetische Induktion in 4 kumulierten Tiefen (1 Sendespule, 4 Empfangsspulen)
- Verrechnung der ECa-Daten in relative Bodenfeuchte, Tiefe zu einer Grenzfläche, Boden(texture)zonen

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



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



<http://www.geoprospectors.com>



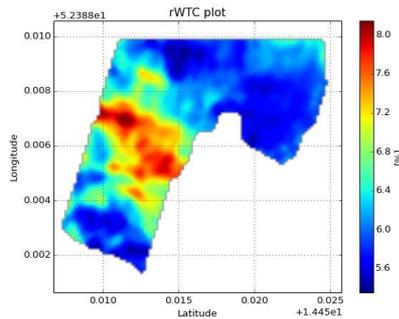
3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



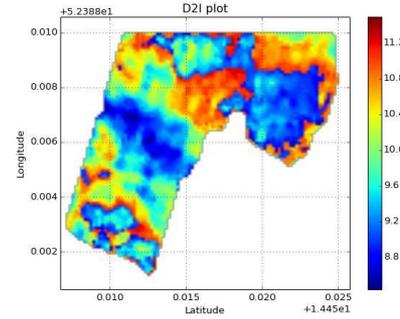
- TopsoilMapper (Geoprospectors): Elektromagnetische Induktion



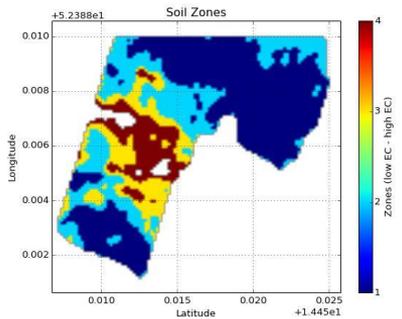
rel. Bodenfeuchte



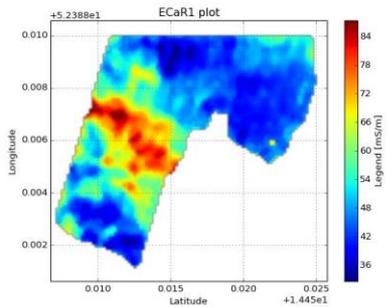
Tiefe zu Grenzfläche



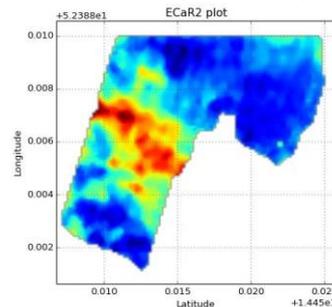
Bodenzonen



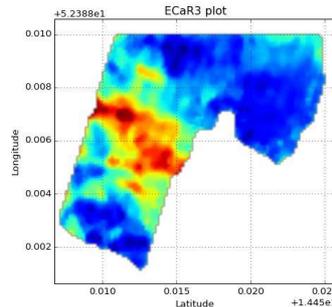
Tiefe 1 (0-10 cm)



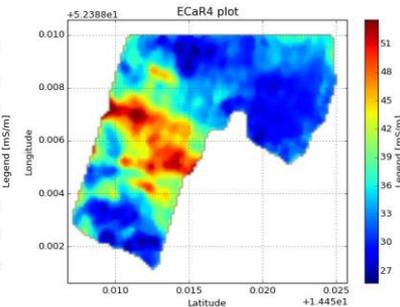
Tiefe 2 (0-40 cm)



Tiefe 3 (0-70 cm)



Tiefe 4 (0-100 cm)

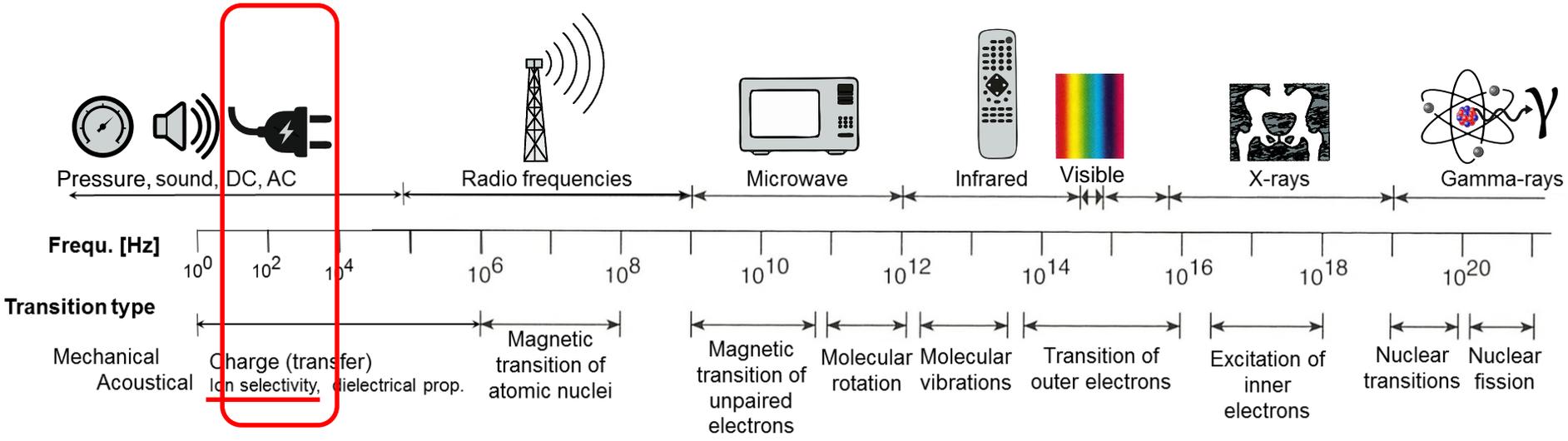


<http://www.geoprospectors.com>



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien

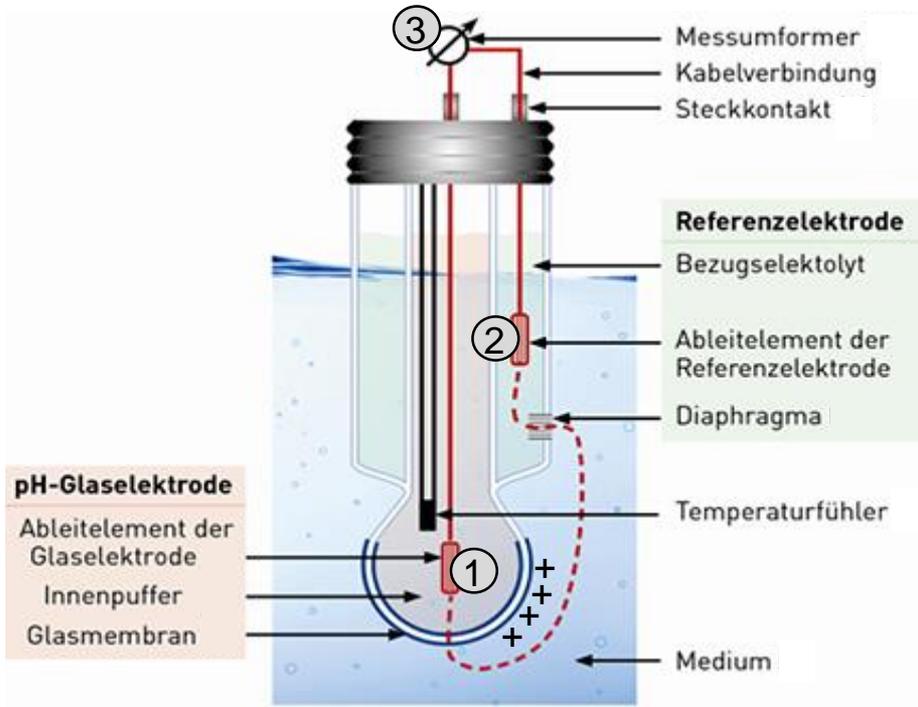
● Elektromagnetisches Wellenspektrum



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



● Ionenselektive Elektroden (ISE) (pH, Nährstoffe): Messprinzip

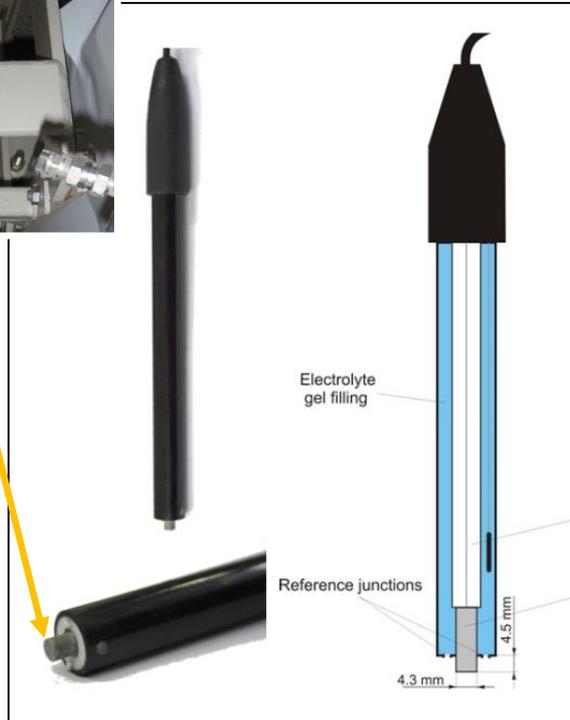
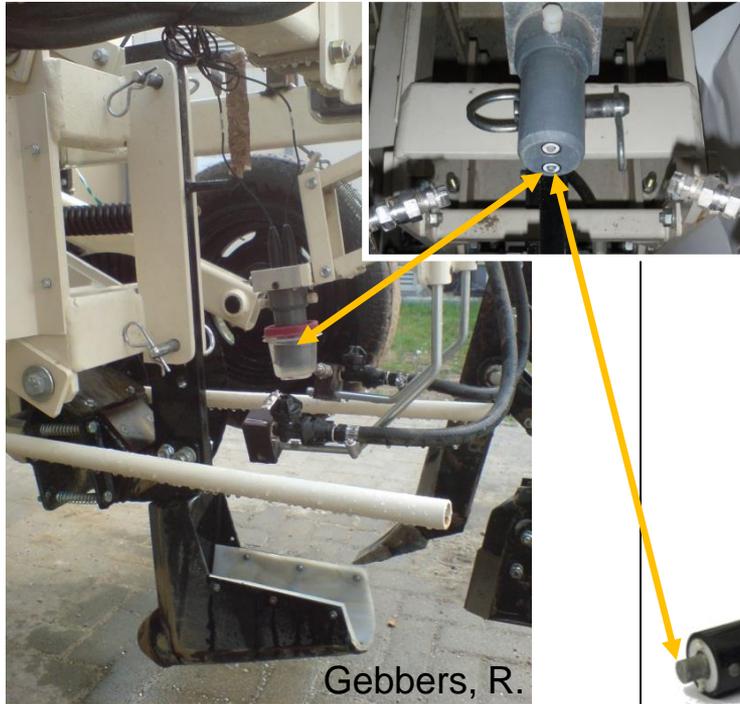


- ISE bestehen aus einer Messelektrode (1) und einer Referenzelektroden (2)
- gemessen wird die Spannung zwischen den beiden Elektroden → Berechnung der Ionenaktivität und Schätzung der Konzentration

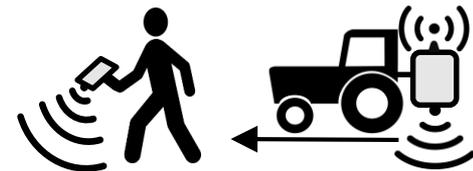
3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



● Ionenselektive Elektroden (ISE): Antimon-pH-ISE



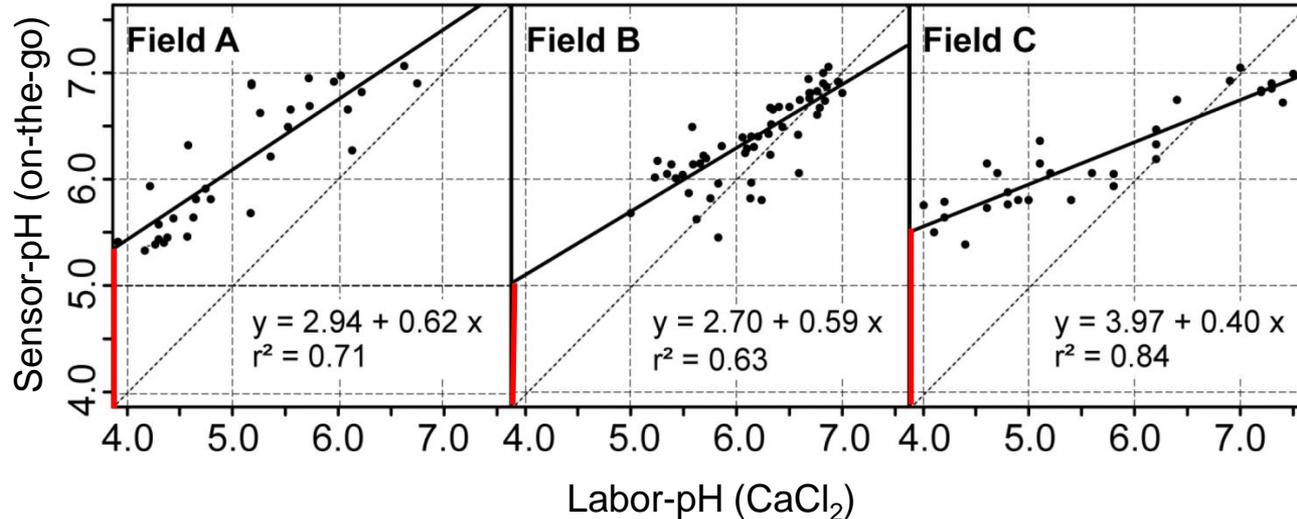
- Metall (Antimon) als Messelektrode → sehr robust für den Feldeinsatz
- misst direkt am Boden → keine wässrige Lösung nötig



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



● Ionenselektive Elektroden: Antimon-pH-Elektrode



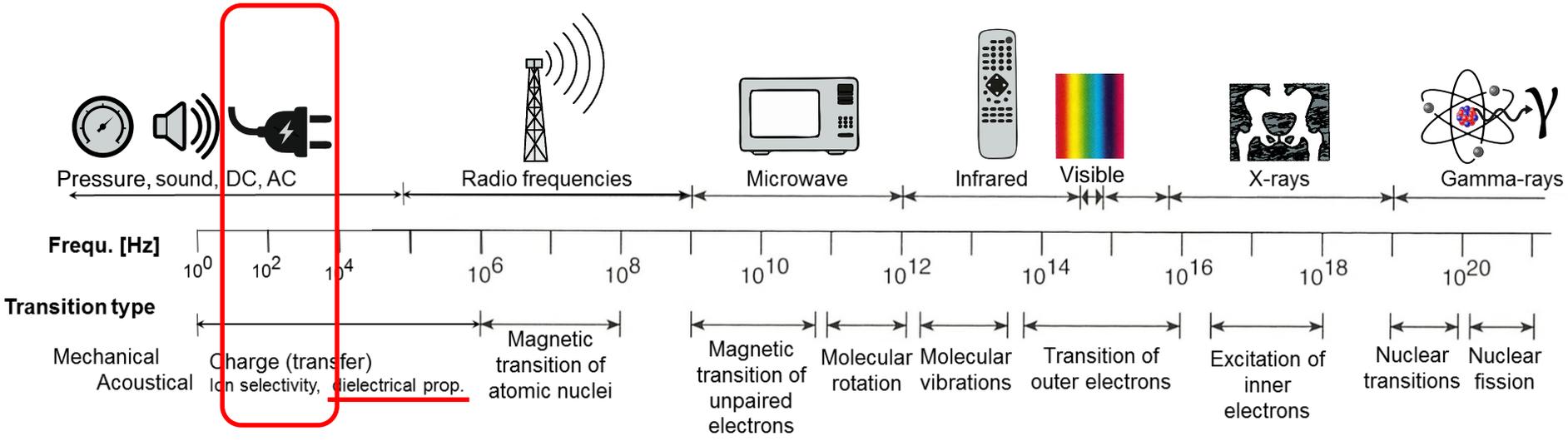
- Gute Korrelationen zwischen Sensor- und Labor-pH-Werten
- Korrelationsmodelle unterscheiden sich von Feld zu Feld → feldspezifische Kalibration nötig



Schirrmann et al. 2011

3. Überblick über verschiedene Messprinzipien

● Elektromagnetisches Wellenspektrum



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



● Time-Domain-Reflectometry (TDR): Bodenfeuchte



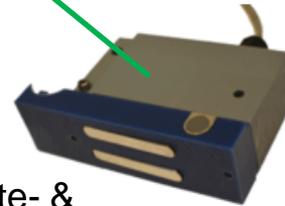
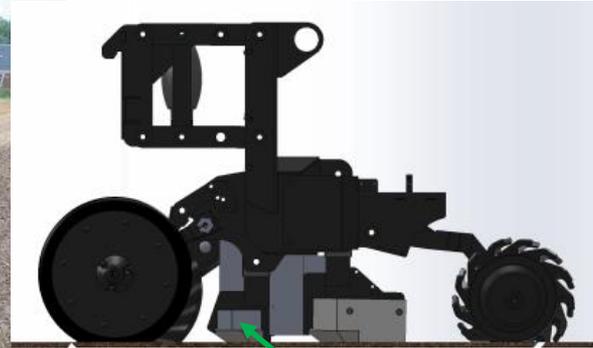
- TDR-Sonden messen die relative Dielektrizitätszahl (Permittivität) des Bodens, die v.a. vom Bodenwassergehalt beeinflusst wird
- guter Kontakt zwischen Messstäben und Boden wichtig (luftgefüllte Hohlräume führen zu Messfehlern)
- natürliche Variabilität der Böden → Einzelmessungen nur beschränkte Aussagekraft → erst Mehrfachmessungen liefern belastbare Ergebnisse
- Bodenfeuchte wird Bodenart (Textur), Struktur (Gefüge), Lagerungsdichte und Humus beeinflusst



<https://delta-t.co.uk/>

5. Sensorfusion durch Multisensorplattformen

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



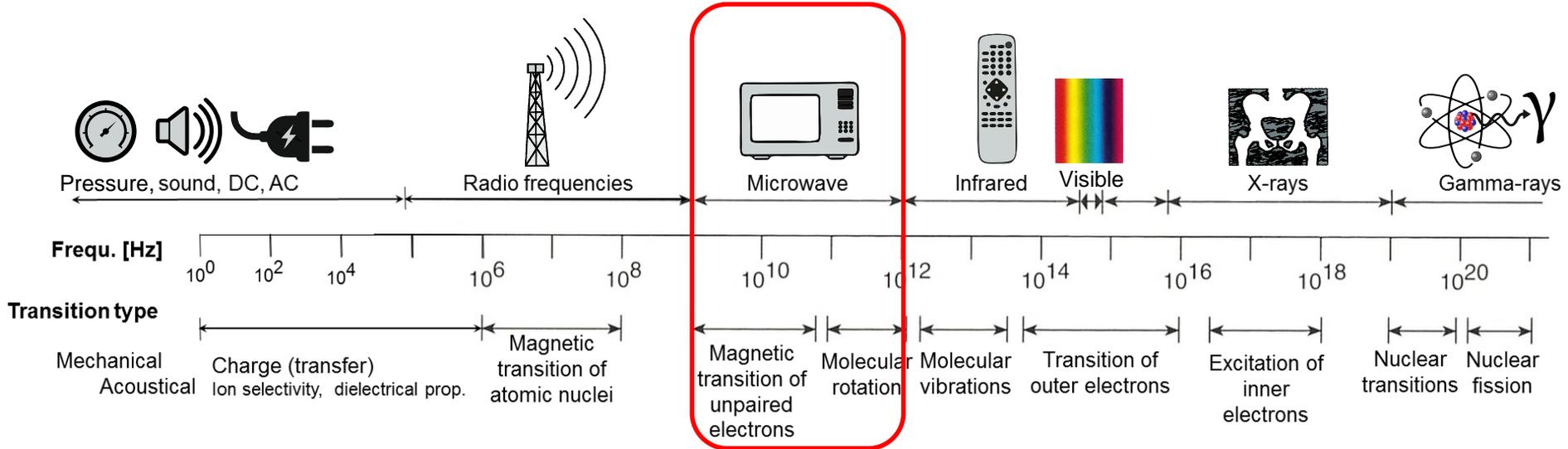
Feuchte- & Temperaturmodul



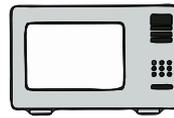
<https://veristech.com/>

3. Überblick über verschiedene Messprinzipien

● Elektromagnetisches Wellenspektrum



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



Mikrowellensensoren (Bodenfeuchte)



- Mikrowellensensor zur Feuchtemessung in Industrieanlagen von homogenen Materialien (z.B. Baumaterial: Sand, Zement, ...)
- Test an heterogenen Böden steht noch aus

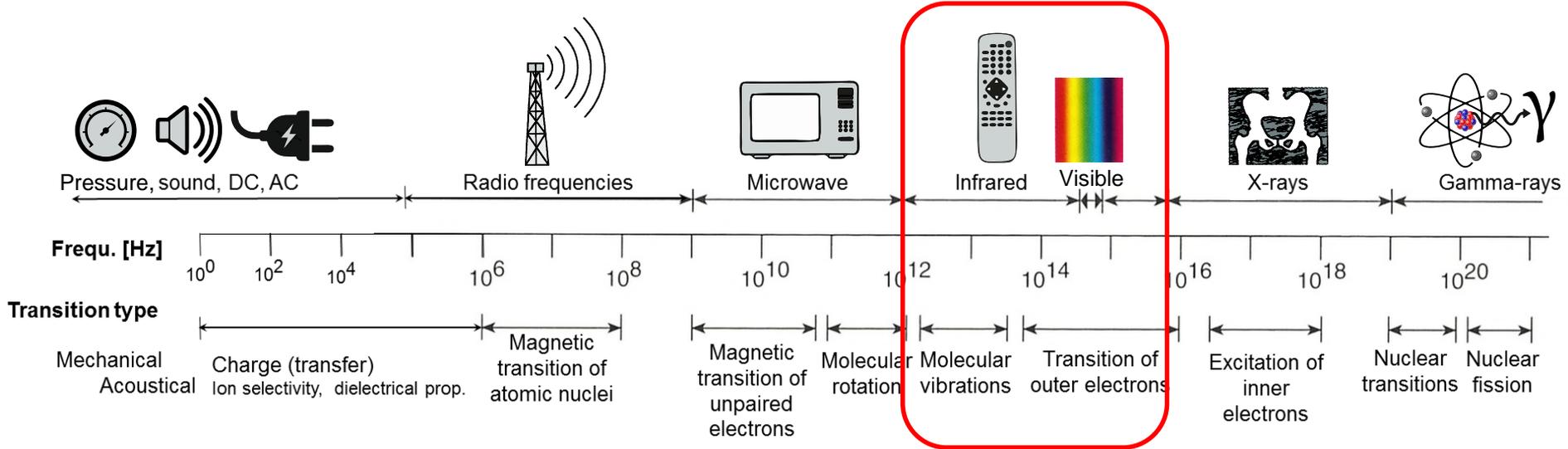


<http://www.hydronix.com>

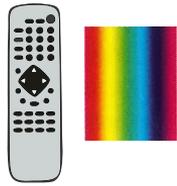


3. Überblick über verschiedene Messprinzipien

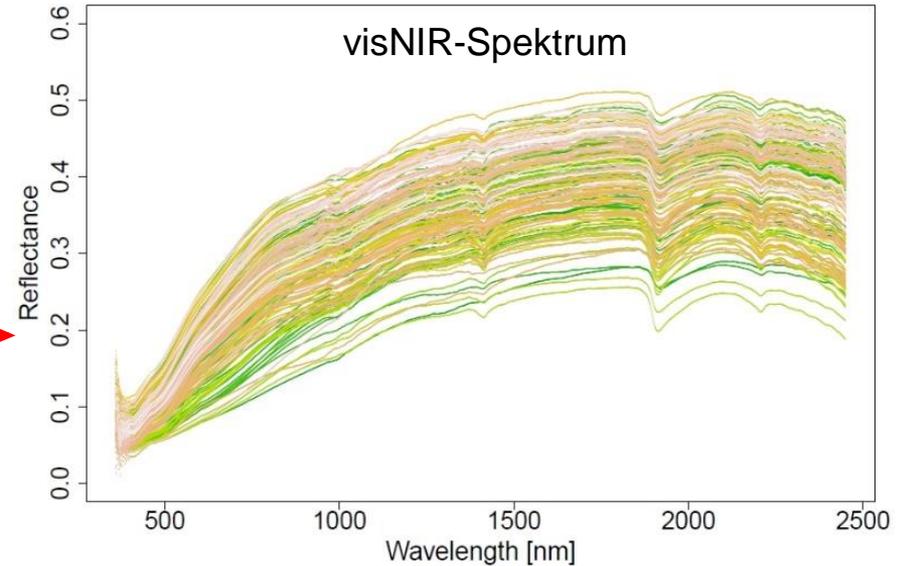
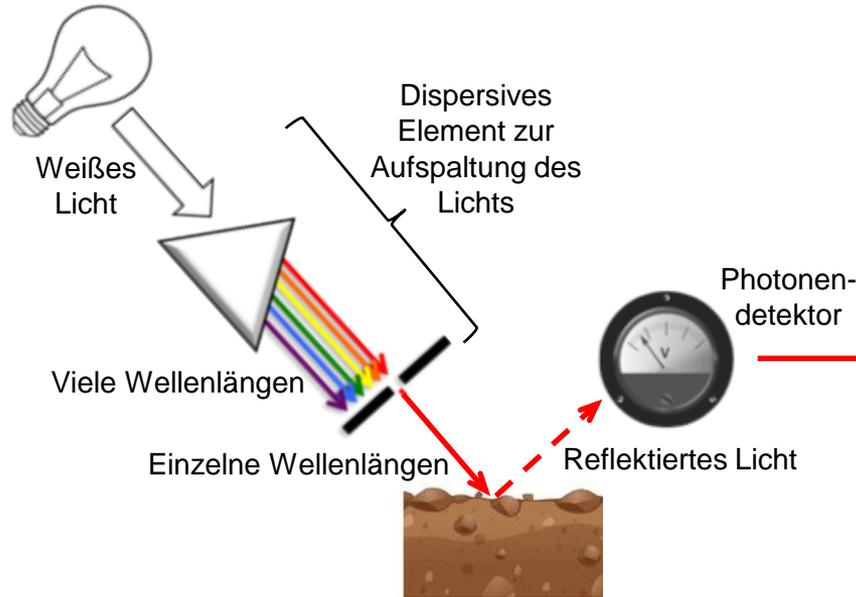
● Elektromagnetisches Wellenspektrum



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



● Optische Spektrometrie (visNIR): Messprinzip

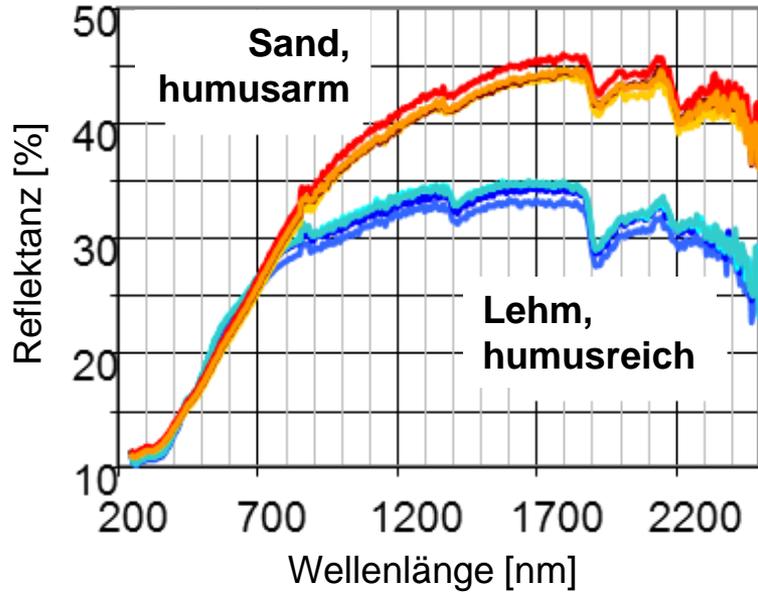


<https://www.varsitytutors.com/> (verändert)

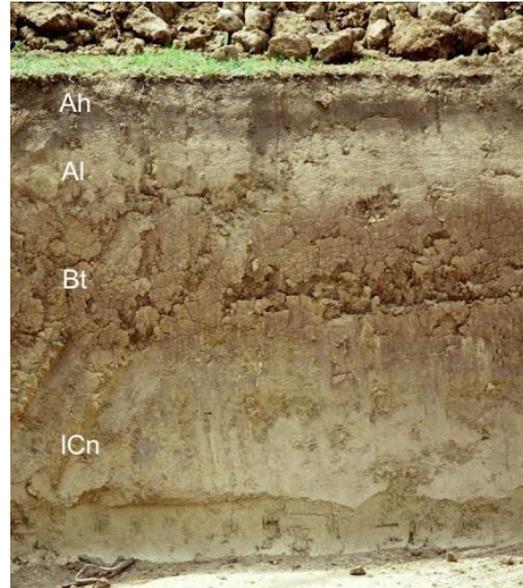
3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



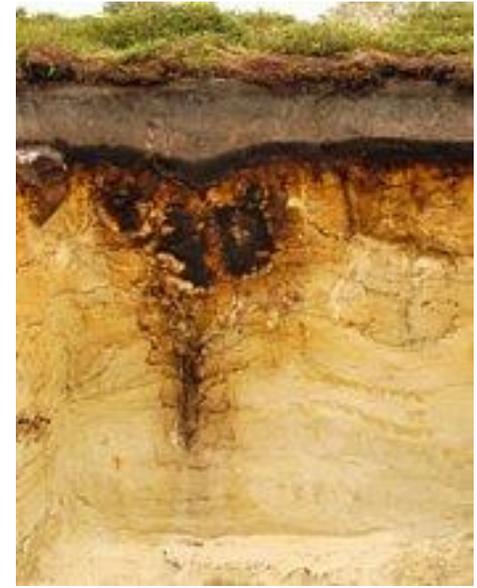
- Optische Spektrometrie (visNIR): Humus, Textur ...



Parabraunerde



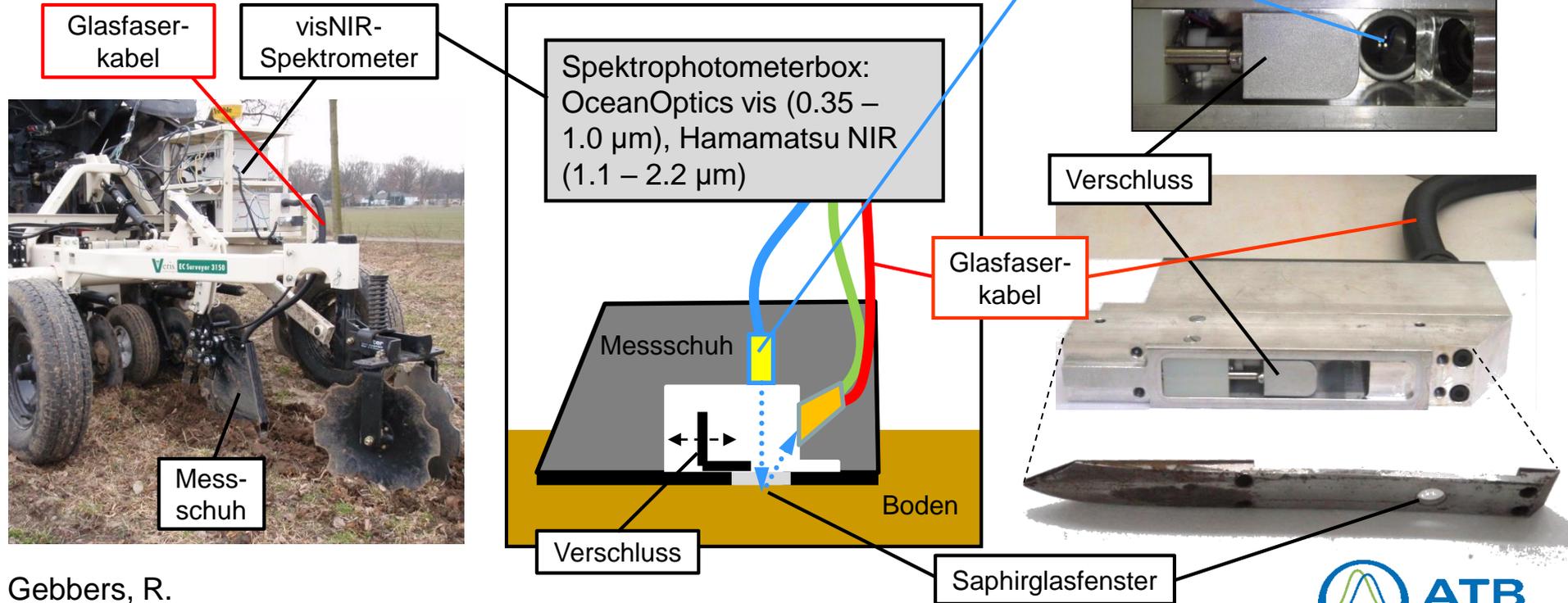
Podsol



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien

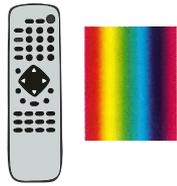


● Optische Spektroskopie: visNIR

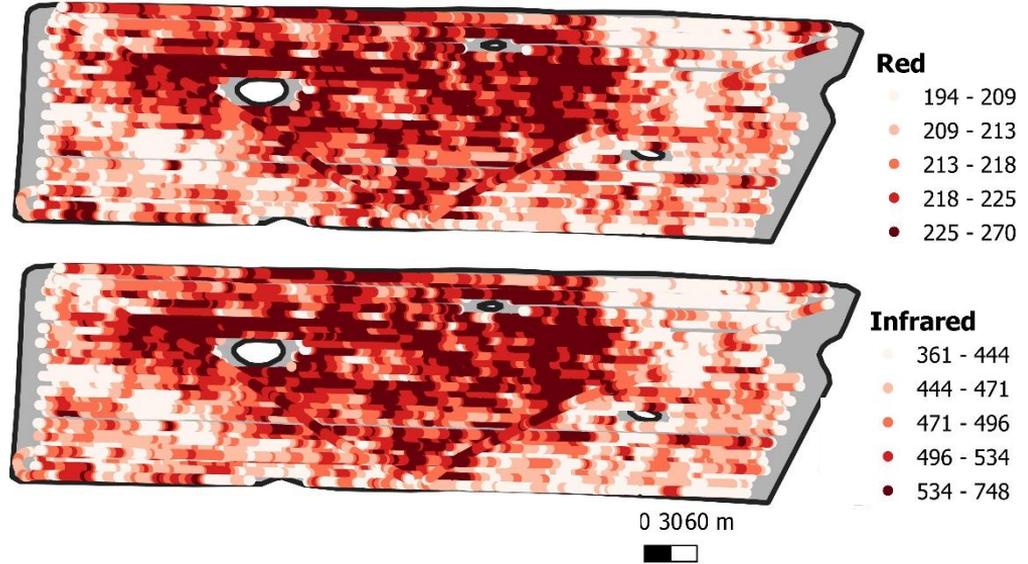
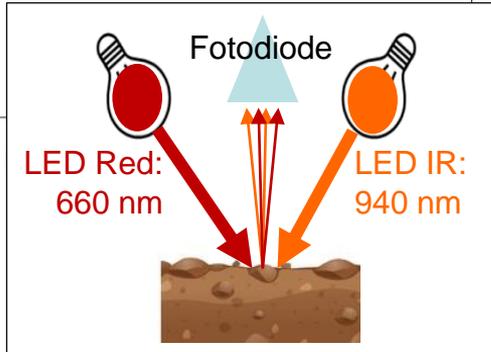
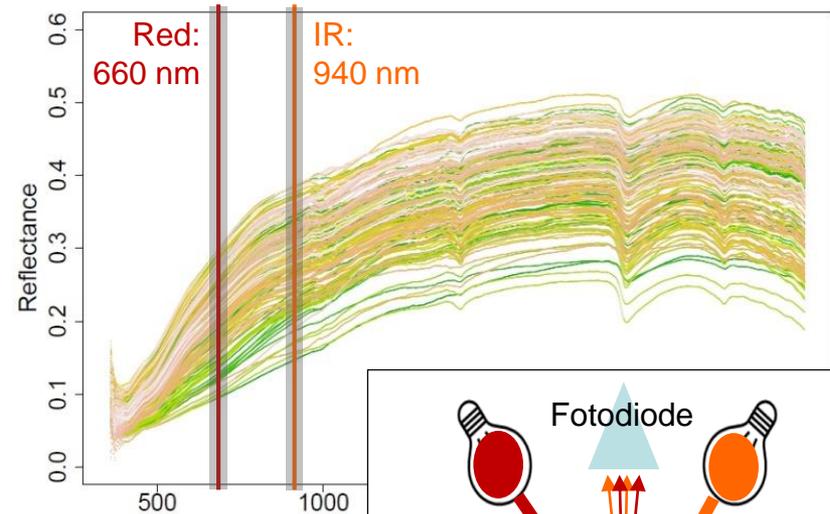


Gebbers, R.

3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



● Optische Spektrometrie (Humusgehalt): Veris OpticMapper



Gebbers, R.

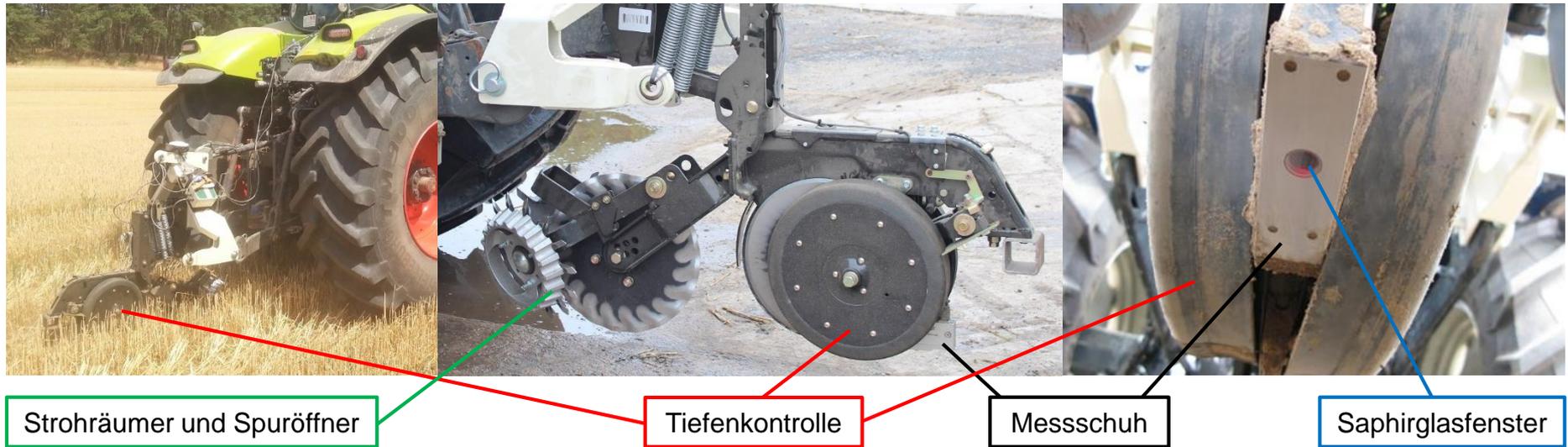
Vogel et al. 2021 (Precision Agriculture)



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



- Optische Spektrometrie (Humusgehalt): Veris OpticMapper



Strohräumer und Spuröffner

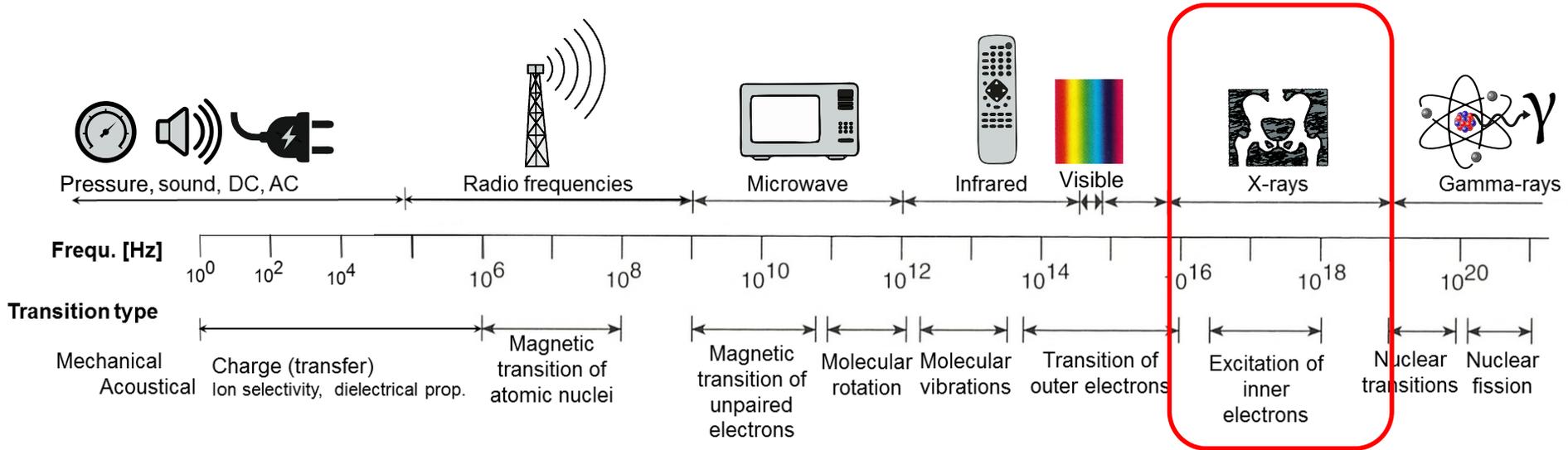
Tiefenkontrolle

Messschuh

Saphirglasfenster

3. Überblick über verschiedene Messprinzipien

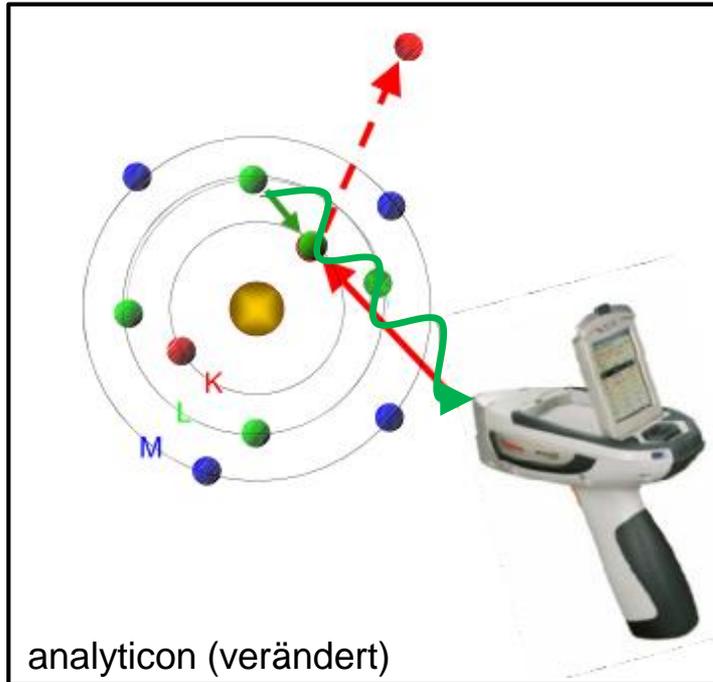
● Elektromagnetisches Wellenspektrum



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



Röntgenfluoreszenzanalyse, RFA (Elementgesamtgehalte): Messprinzip



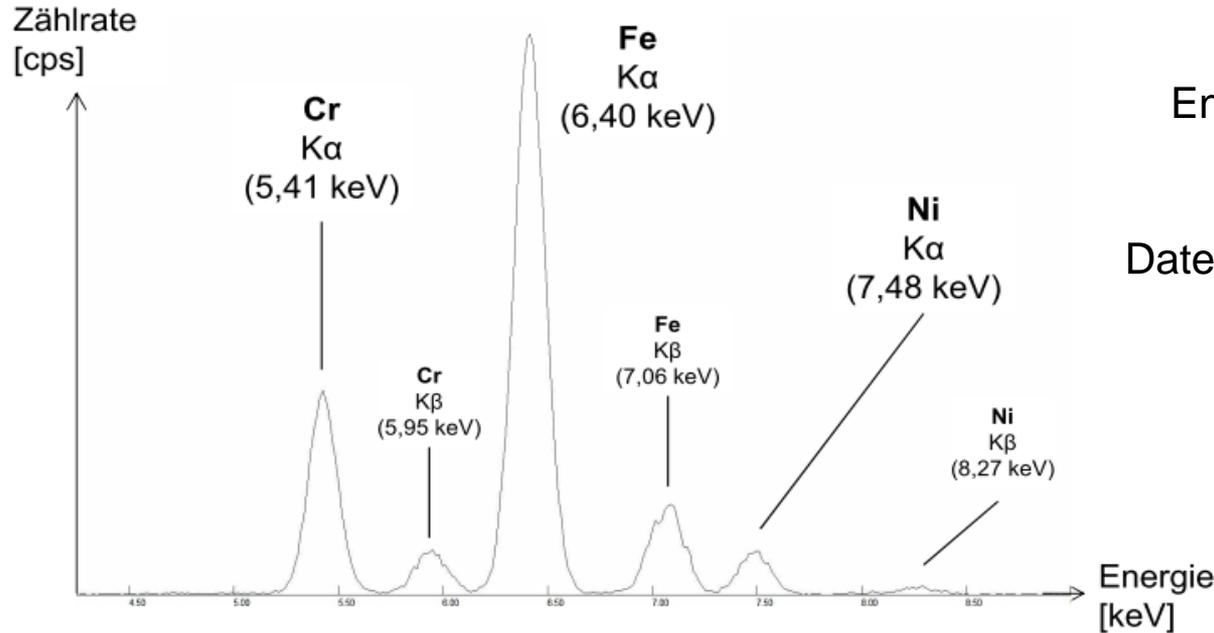
1. Anregung von Elektronen durch hochenergetische Röntgenstrahlung 
2. Herausschlagen von Elektronen aus der Atomhülle 
3. Ersatz durch Elektronen aus höherer Schale (Energieniveau) 
4. Energiedifferenz als Photonen abgegeben (Fluoreszenzstrahlung, Energieabgabe charakteristisch für Atom eines bestimmten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



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



● Röntgenfluoreszenzanalyse, RFA (Elementgesamtgehalte)

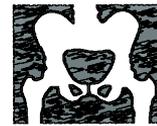


Energiespektrum: Qualitative und quantitative Auswertung von Spektren mithilfe bestehender Datenbanken für bestimmte Medien



analyticon (verändert)

3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



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		Leicht-Filter	Hoch-Filter												Al 13 Aluminium	Si 14 Silicium	P 15 Phosphor	S 16 Schwefel	Cl 17 Chlor
				Nebengruppen																	
				III b	IV b	V b	VI b	VII bVIII b.....	I b	II b										
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 -	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



analyticon (verändert)



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



● Röntgenfluoreszenzanalyse, RFA (Elementgesamtgehalte)

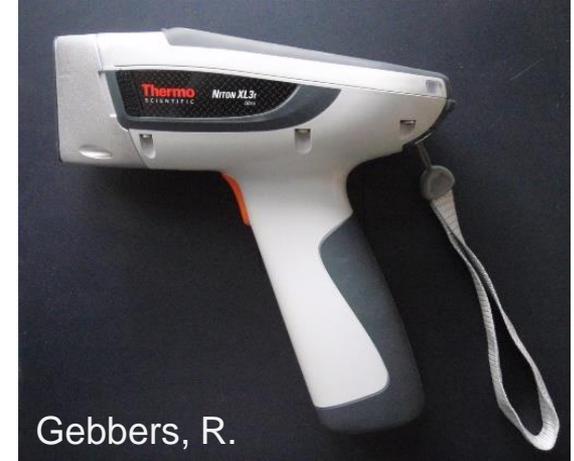
Direkte Erfassung von:

- 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

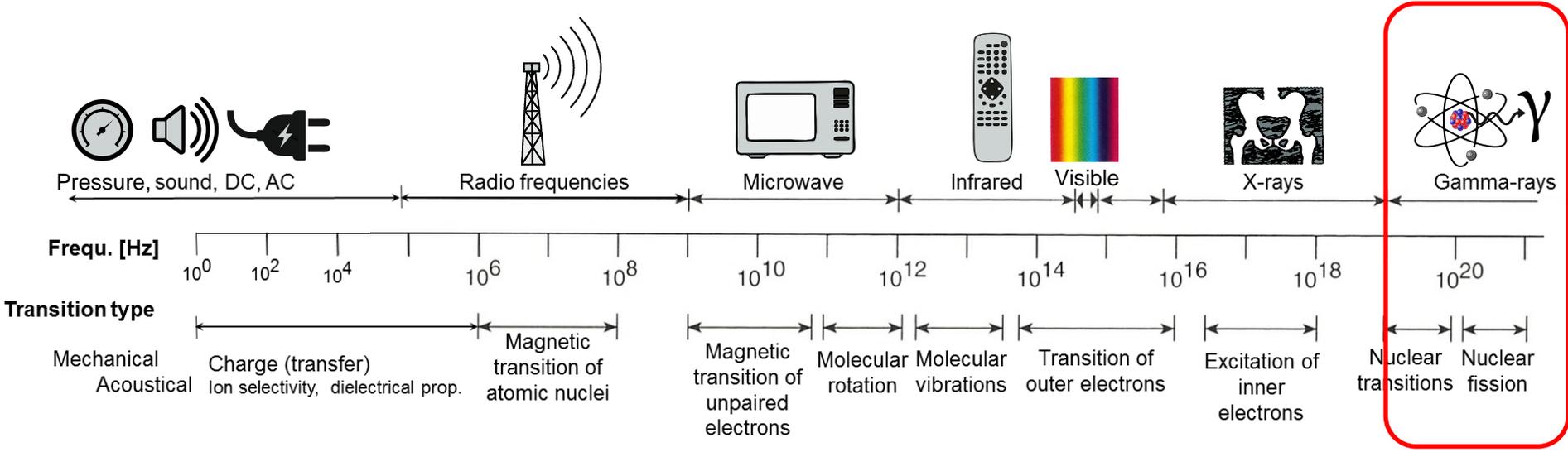


Gebbers, R.

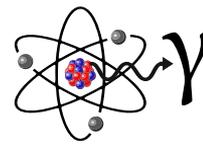


3. Überblick über verschiedene Messprinzipien

● Elektromagnetisches Wellenspektrum

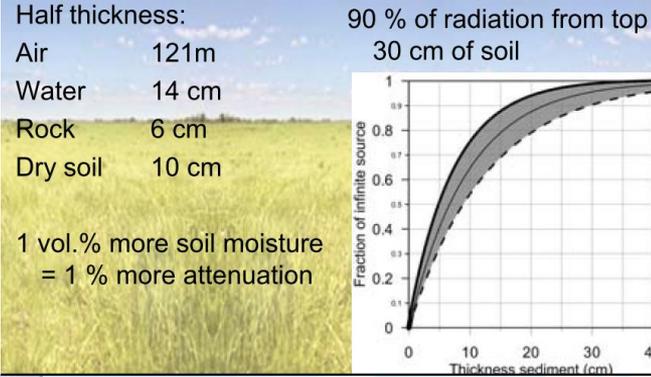


3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



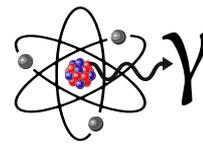
● Passive Gamma-Spektrometrie (Textur, K-Gehalt)

Gamma-Spektrometer messen nicht-invasiv die Strahlung die beim natürlichen Zerfall von Uran (^{238}U), Kalium (^{40}K), Thorium (^{232}Th) und teilweise Caesium (^{137}Cs) entsteht

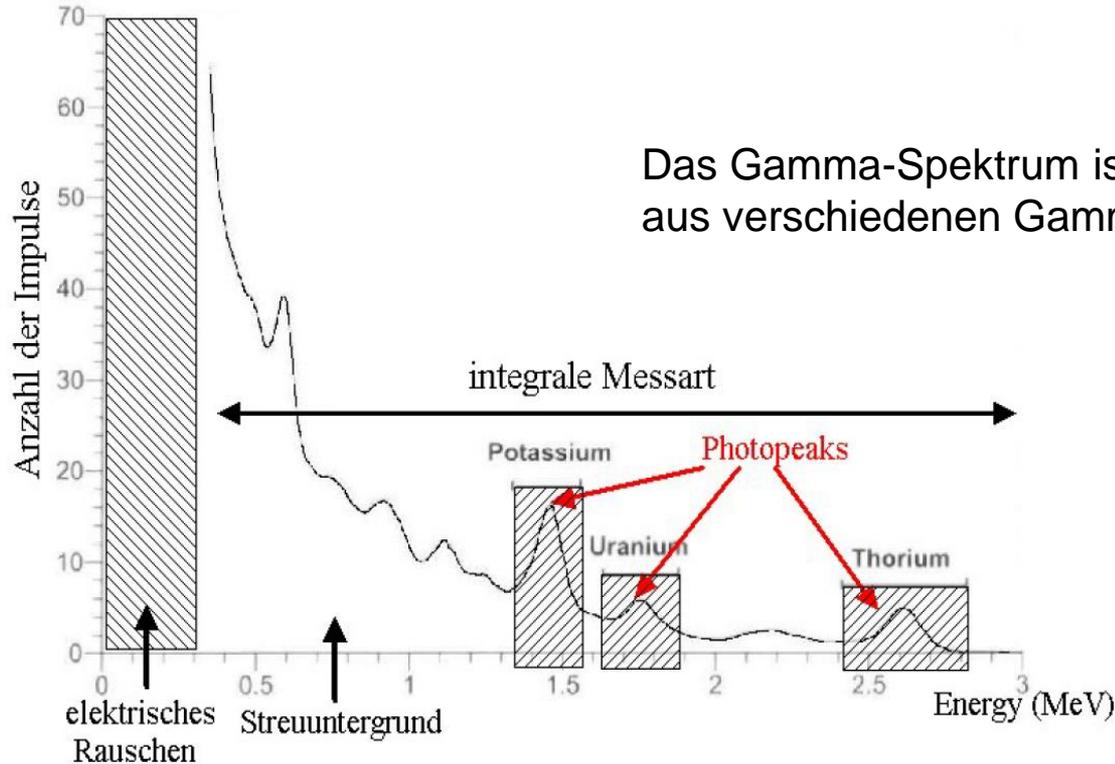


<https://the.medusa.institute/>

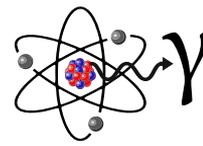
3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



● Passive Gamma-Spektrometrie (Textur, K-Gehalt)



3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



● Passive Gamma-Spektrometrie (Textur, K-Gehalt)

Total counts

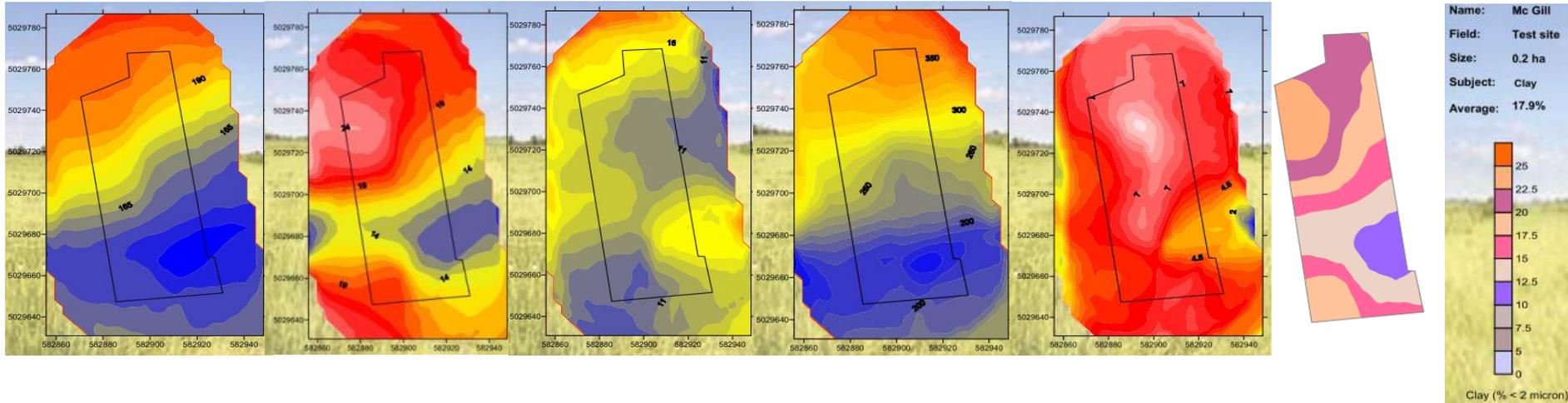
Kalium-40

Uran-238

Thorium-232

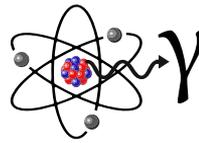
Cesium-137

geschätzter Tongehalt %

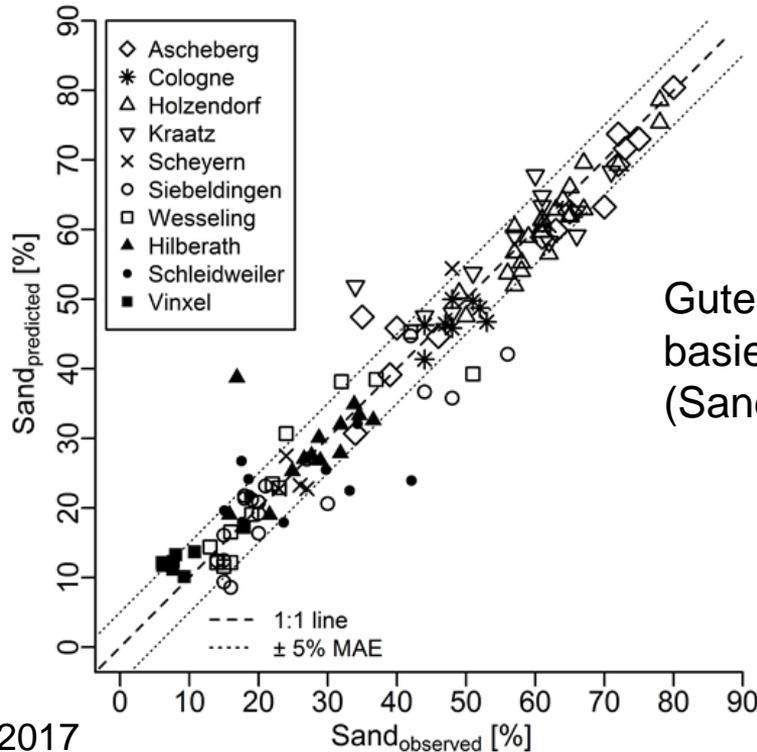


Da Kalium im Boden meist mit Ton assoziiert ist, bestehen oft enge Beziehungen zwischen ^{40}K und Tongehalt.

3. Überblick über verschiedene Messprinzipien



● Passive Gamma-Spektrometrie (Textur, K-Gehalt)

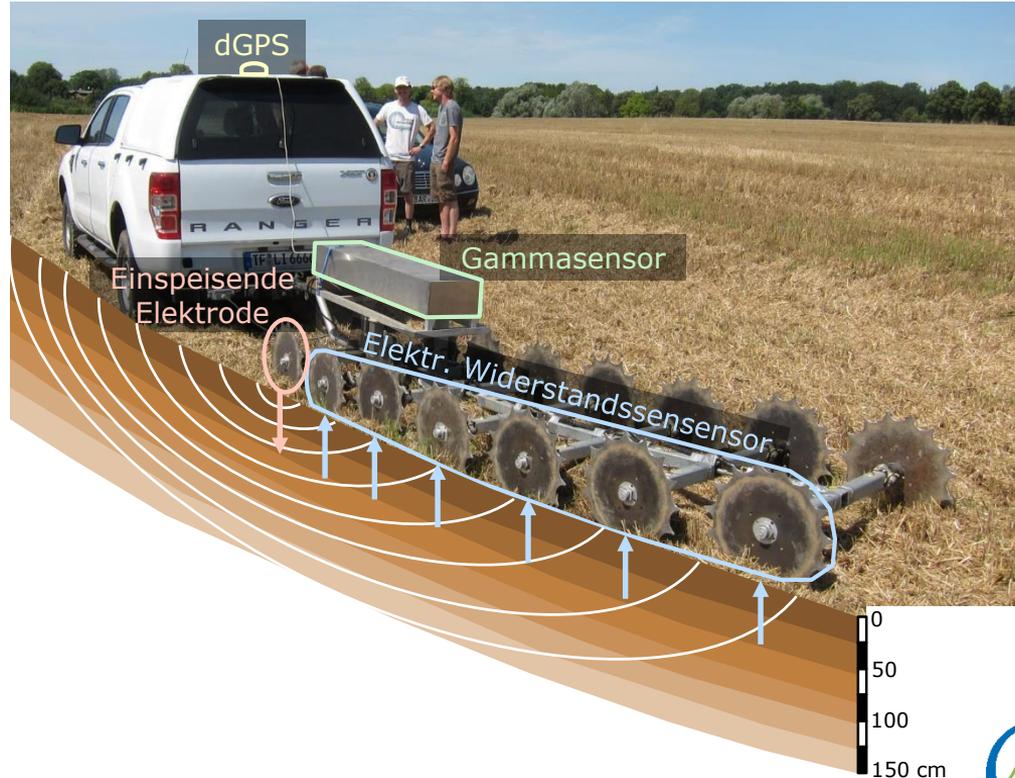


Gute Ergebnisse bei der Bodentexturschätzung basierend auf einem landesweiten Datensatz (Sand $r^2=0,96$, Schluff $r^2=0,93$, Ton $r^2=0,78$).

4. Sensorfusion durch Multisensorplattformen

● Geophilus-Multisensorplattform

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



<https://www.geophilus.de/>

4. Sensorfusion durch Multisensorplattformen

● 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

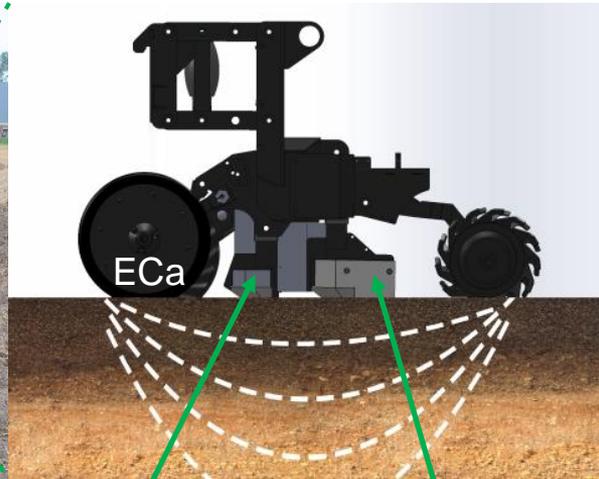
1. ECa
2. OpticMapper

1. Durchdringungswiderstand
2. OpticMapper
3. ECa

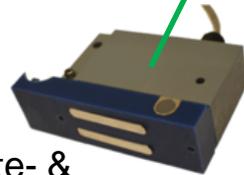
<https://veristech.com/>

4. Sensorfusion durch Multisensorplattformen

● Veris technologies (iScan)



1. ECa
2. Bodenfeuchte
3. Temperatur
4. OpticMapper



Feuchte- & Temperaturmodul



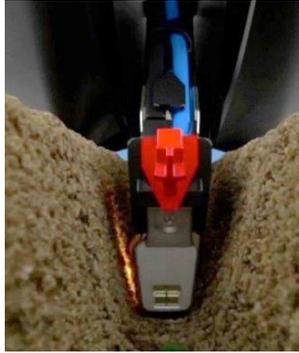
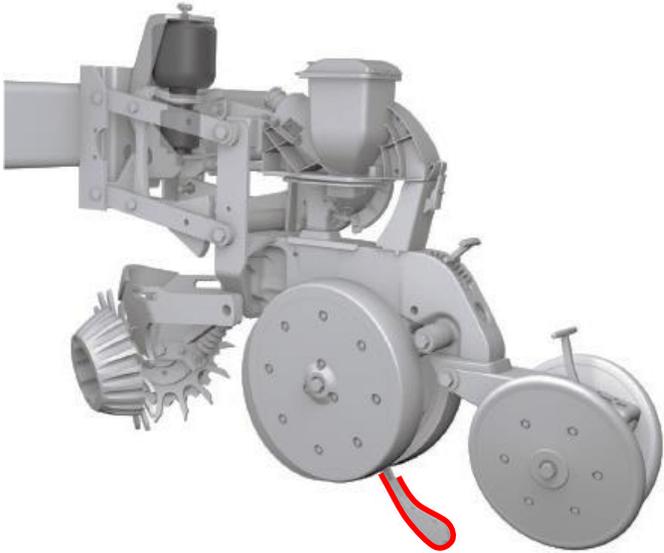
OpticMapper-Modul

<https://veristech.com/>



4. Sensorfusion durch Multisensorplattformen

● SmartFirmer (sensorbasierte Aussaatmaschine)



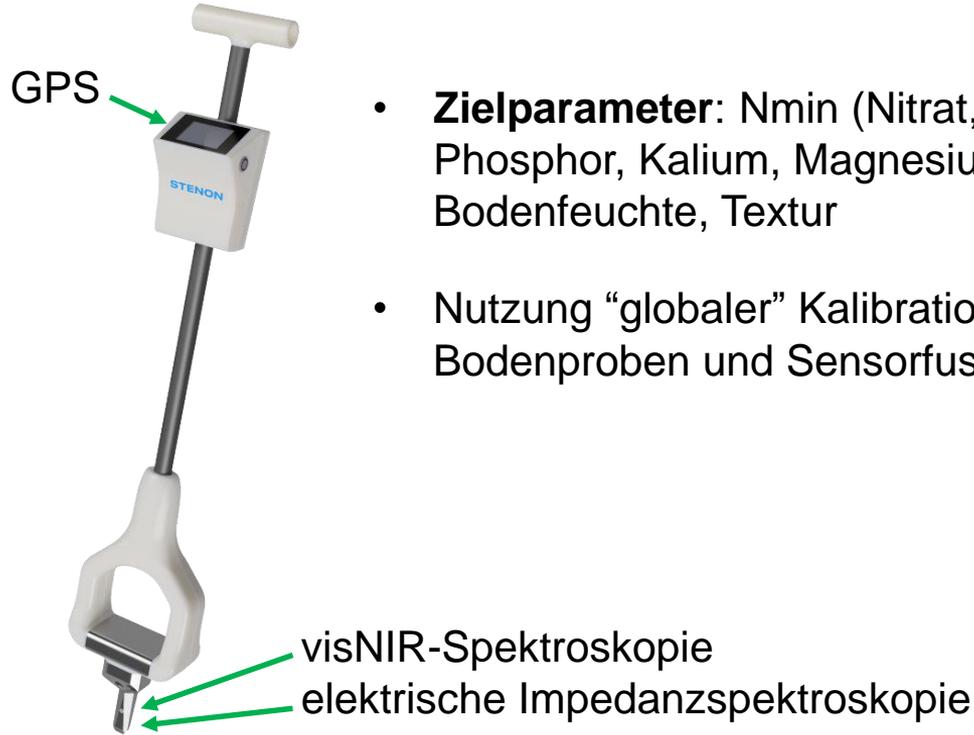
- nutzt engbandige Lichtquellen: blau, orange, infrarot
- mögliche andere Sensoren: Druck, IR Thermometer (keine genauen Angaben erhältlich)
- erfasst Feuchte, Temperatur, Humus, Furchenstruktur
→ an Bodenfeuchte angepasste Ablagetiefe und Schardruck
- keine unabhängige wissenschaftliche Evaluierung



<https://www.precisionplanting.com>

4. Sensorfusion durch Multisensorplattformen

● Stenon FarmLab: „Laborunabhängige Laboranalyse in Echtzeit“



- **Zielparameter:** Nmin (Nitrat, Ammonium), pflanzenverfügbare Phosphor, Kalium, Magnesium, pH-Wert, Humus, Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Textur
- Nutzung “globaler” Kalibrationsmodelle aus mehreren tausend Bodenproben und Sensorfusion → **keine Laboranalysen mehr nötig**

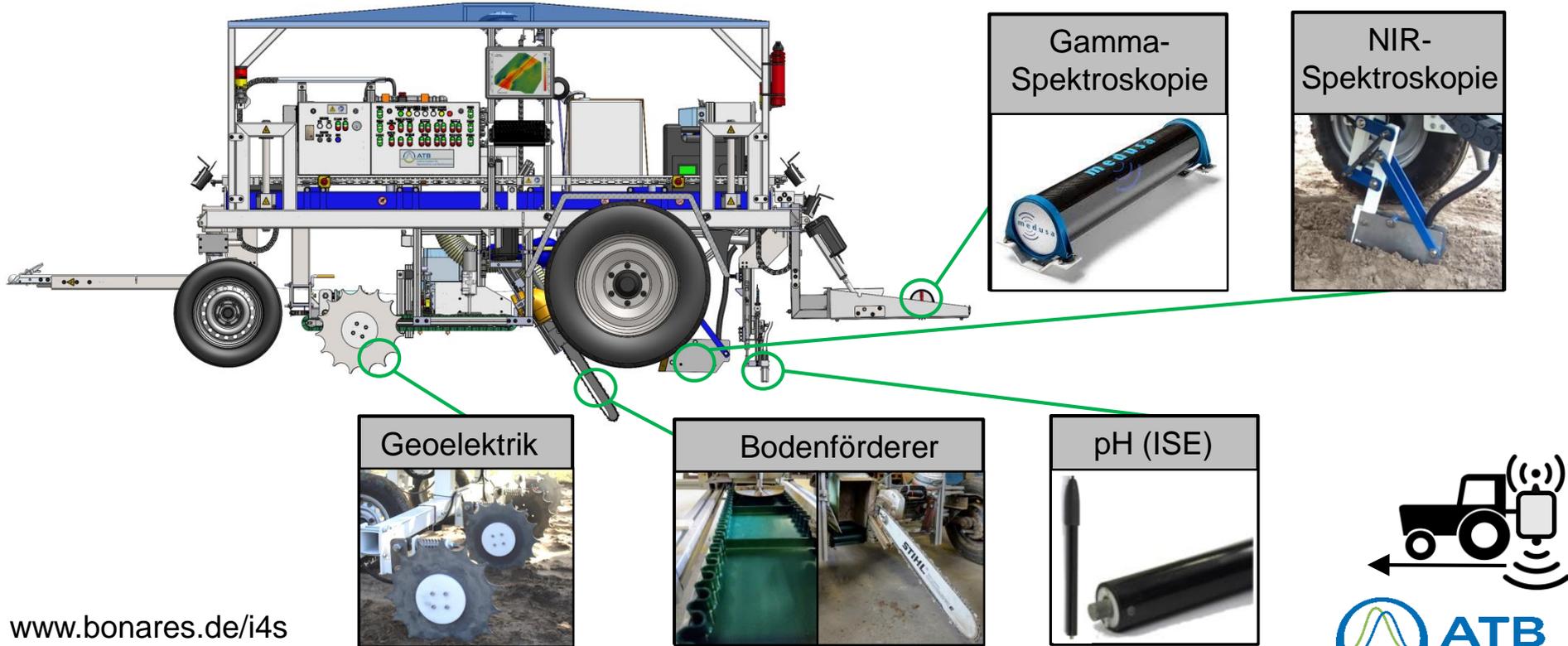


<https://stenon.io/>



4. Sensorfusion durch Multisensorplattformen

● RapidMapper (im Projekt I4S entwickelter Demonstrator)



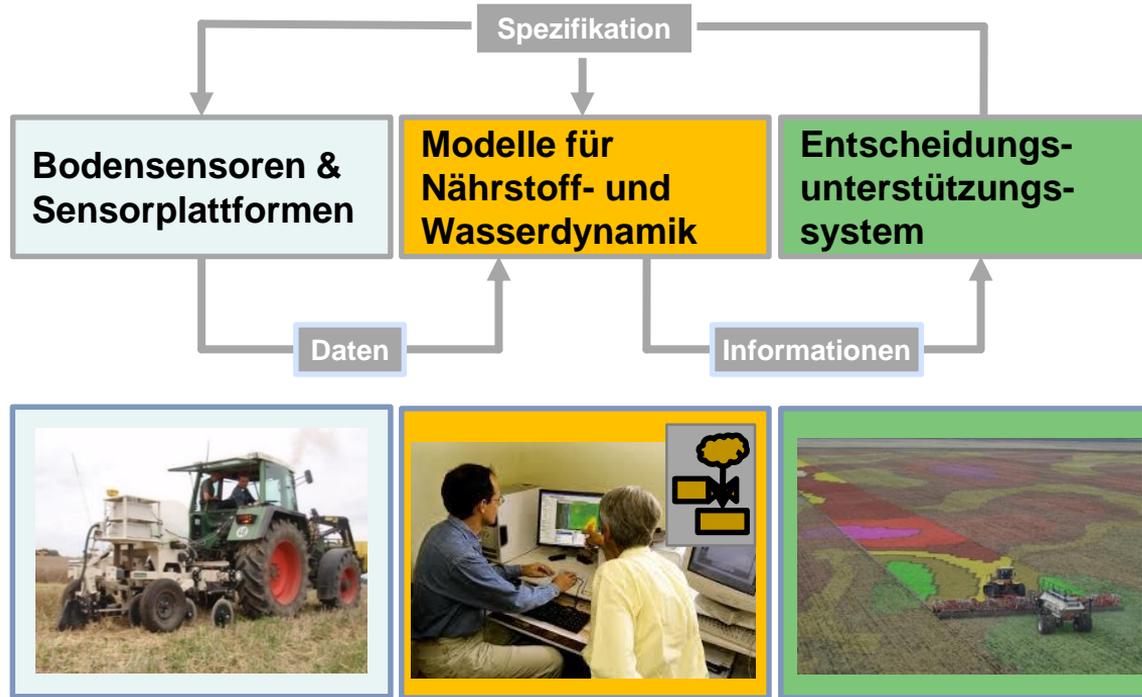
www.bonares.de/i4s

5. Schlussfolgerungen

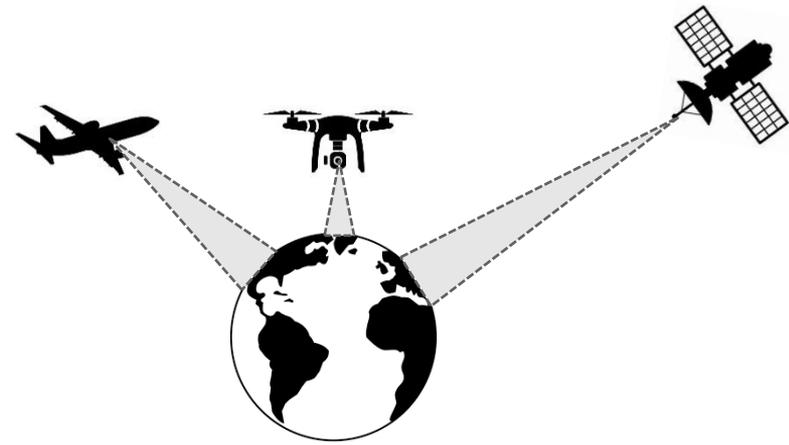
- Die sensorbasierte Kartierung kann räumlich hoch aufgelöste Informationen zu Bodeneigenschaften liefern
- Die Sensordaten sind meist indirekte Messungen → müssen durch Laboranalysen der Zieleigenschaften meist schlagweise kalibriert werden
- Der Arbeitsaufwand ist hoch (Kartierung, Datenbereinigung, Referenzbeprobung und -analyse, Kalibration)
- Automatisierte Prozessierung von Sensordaten noch in der Entwicklungsphase (pH-BB-Software zur sensorbasierten präzisen Kalkung)
- Datenfusion ist methodisch anspruchsvoll, kann die Qualität der Vorhersagemodelle aber teilweise deutlich erhöhen
- Wissenstransfer braucht langen Atem und mehr Demonstrationsbetriebe

5. Schlussfolgerungen

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



Gebbers, R.



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

Haben Sie Fragen?
svogel@atb-potsdam.de

