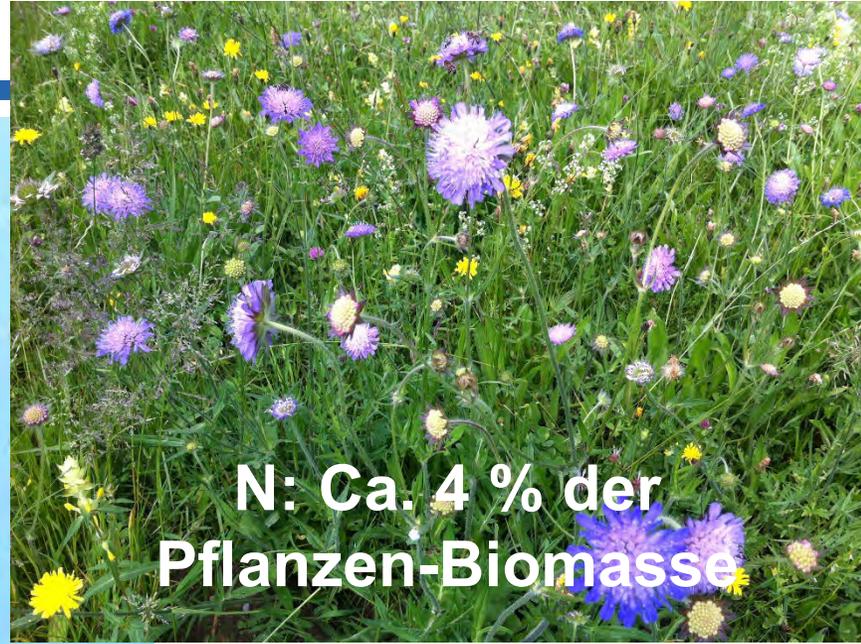
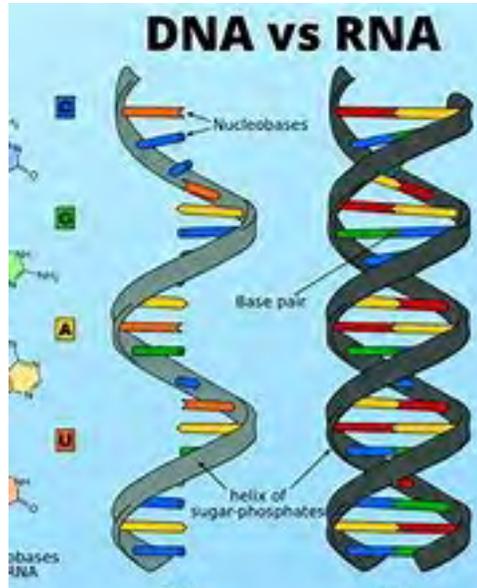


# Motor des Lebens: Die Bedeutung des Stickstoff-Kreislaufs für unseren Planeten

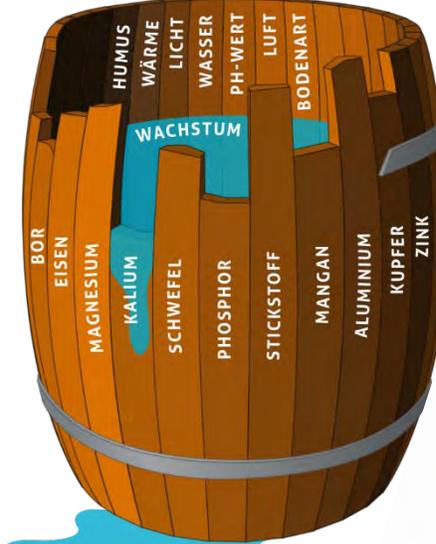
Prof. Nina Buchmann, ETH Zürich, Schweiz



# Stickstoff



## Makronährstoff



7 Nicht-Metall

**N**

**Nitrogen**

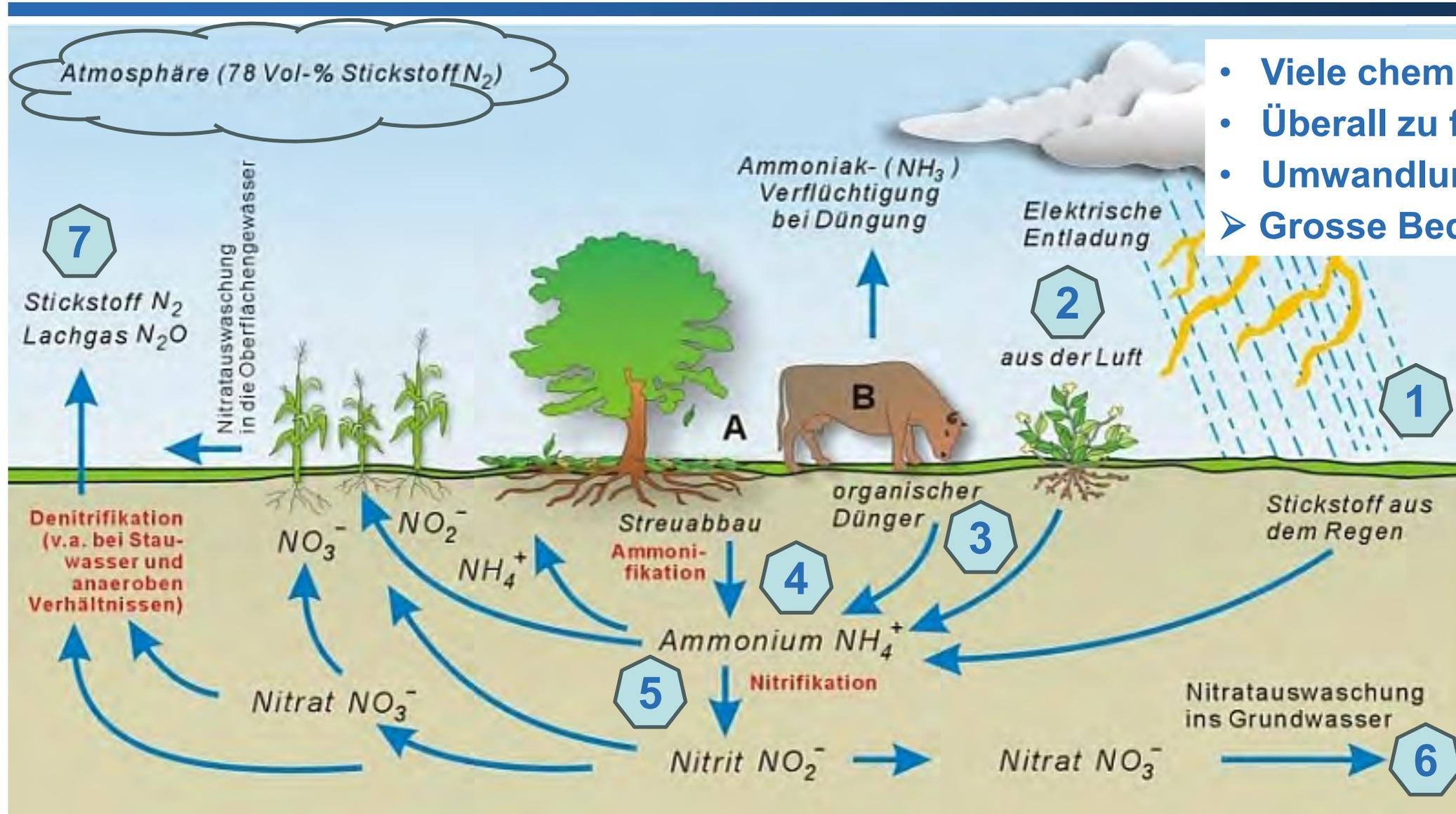
**14.007**



**N<sub>2</sub>: 78 % der Luft**



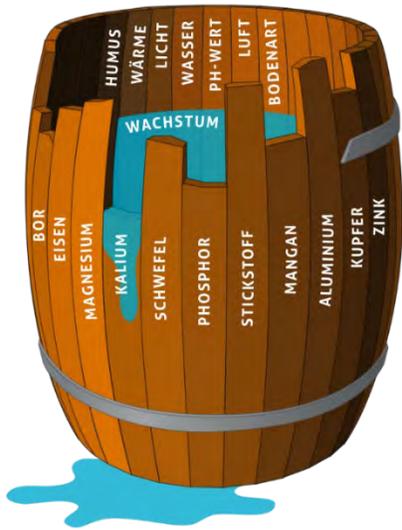
# Stickstoff-Kreislauf: komplex, dynamisch, spannend



- Viele chemische Formen
- Überall zu finden
- Umwandlungsprozesse
- Grosse Bedeutung

# Kleinjogg

**Minimum-Tonne:** Von Carl Sprengel erkannt (1828), von Justus von Liebig bekannt gemacht (1803-1873)



**Kleinjogg:** Jakob Gujer (? , getauft 1718 in Wermatswil; gestorben 1785 in Rümlang)

Jean-Jacques Rousseau: „*Heureux le pays où les Klijoggs cultivent la terre et où les Hirzels cultivent les lettres.*“ (11. November 1764)

Johann Wolfgang von Goethe: „*Ich komme von Klijog, wo ich mit Lavater, den Stolbergs, Haugwitz und anderen guten Jungs war. (...) Ich ging ohne Ideen von ihm hin, und kehre reich und zufrieden zurück.*“ (Juni 1775)

# Kleinjogg – Der philosophische Bauer (H.C. Hirzel 1761)

Dienstag, 9. August 2016

Neue Zürcher Zeitung

ZÜRICH UND REGION 17

## Zürichs schlauer Bauer

Der Landwirtschaftsreformer Jakob Gujer wird heute vor 300 Jahren in der

Jakob Gujer, genannt Kleinjogg, ist im 18. Jahrhundert als Musterbauer und Pionier der Landwirtschaft in ganz Europa bekannt. Goethe und andere Prominente besuchen ihn auf seinem Hof und lernen auch überraschende Seiten kennen.



Kleinjogg vor seinem Hof. Druckgrafik nach einem Gemälde von Johann H.

MAX FÜRBER

Im 18. Jahrhundert, dem Zeitalter der Aufklärung, ist Jakob Gujer keineswegs der Einzige, der sich neuen Gedanken und Strömungen gegenüber öffnet. Doch der Zürcher Stadtrat und Ratsherr Hans Caspar Hirzel (1725–1803) ist ein Vertreter des Musterbauern und verbreitet dessen Erkenntnisse weit über damalige Grenzen hinaus. Seine Schriften tragen Titel wie «Die Wirtschaft eines philosophischen Bauern» (1761) und «Kleinjogg oder Thun und Denken eines naturnahen glückseligen Bauern» (1774). Letzteres ist heutzutage Landwirten als Lebenssinn zu wünschen. Kleinjoggs Popularität besichert ihm auf dem Katzenrütlihof zahlreiche prominente Besucher wie Johann Wolfgang von Goethe, Angelo Quirini und Adlige aus Deutschland.

### Kleiner und grosser Jakob

Dank den Publikationen Hirzels, der stets verdeutlicht «Kleinjogg» schrieb, bleiben dessen Gedanken und dessen Wirken überliefert, da von ihm selbst nur wenige schriftliche Zeugnisse erhalten sind. Hirzel stellt eindrücklich Kleinjoggs Menschenbild dar, dessen Denken sowie die praktizierten bäuerlichen Versuche. Lobende Urteile mehrerer Zeitgenossen, die Gujer persönlich kennenlernten oder sich aufgrund von Veröffentlichungen oder der Übersetzung «Le Société rustique» (1762) ihre Meinung gebildet haben, ergänzen die Darstellung des begeisterten Hirzel.

Unter dem Datum 9. August 1716 ist «Jacob», Sohn von Rudolf und Anna Gujer von «Wermeschwyl», im Taufregister der Kirchgemeinde Uster vermerkt. Dem im Dialekt «Chiljogg» (= Klein-Jakob) genannten Gujer hat nicht eine mögliche Kleinwüchsigkeit den Übernamen eingebracht, sondern dieser unterscheidet ihn von einem gleichnamigen älteren Bruder. Nachdem

Datum: 16.09.2016

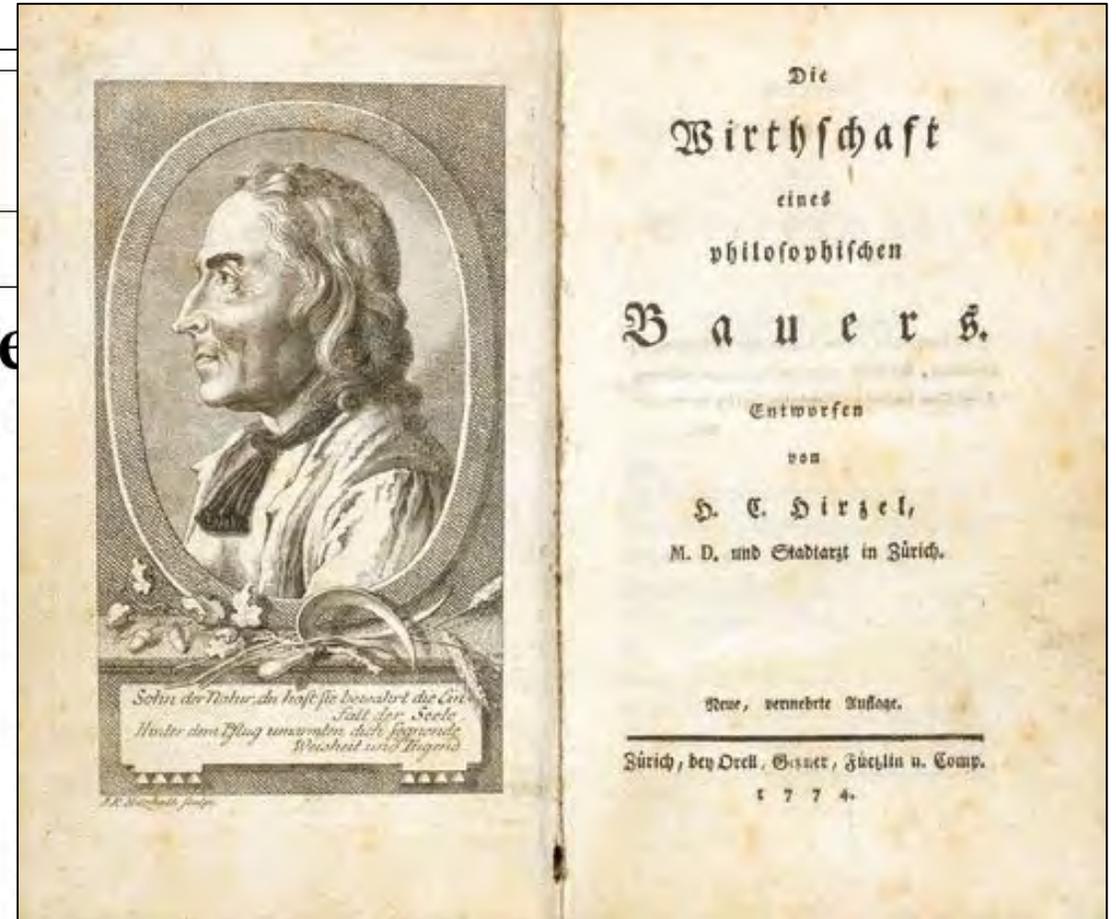
## Tages-Anzeiger

Tages-Anzeiger  
8021 Zürich  
044 / 248 44 11  
www.tagesanzeiger.ch

Medienart: Print  
Medientyp: Tages- und Wochenpresse  
Auflage: 162'894  
Erscheinungsweise: 6x wöchentlich

## Schlauer Vorzeige

Eine neue Gedenkschrift ehrt Kleinjogg, der in ganz Europa bekannt war, weil er auf Mist baute.



- Vortrag 1761 in «Physikalischen Gesellschaft»
- und eine 160 Seiten umfassende Schrift  
→ in 5 Sprachen übersetzt

... eines Jakobs, und weil sein älterer Bruder auch Jakob hiess, rief man ihn «Chiljogg». Die Grossfamilie Gujer gehörte zu

# Kleinjogg – Wegbereiter der modernen Landwirtschaft



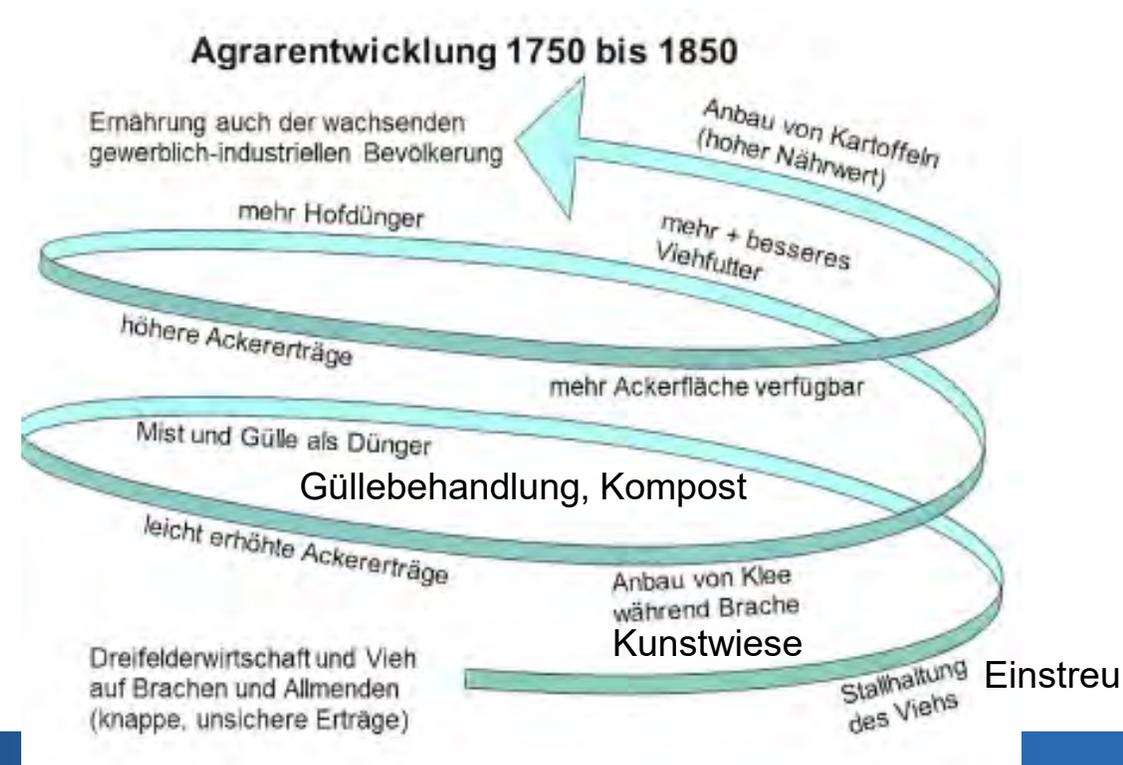
## Kleinjogg Wegbereiter der modernen Landwirtschaft.

Gedenkschrift zum 300. Geburtstag von Jakob Gujer  
2., aktualisierte Auflage

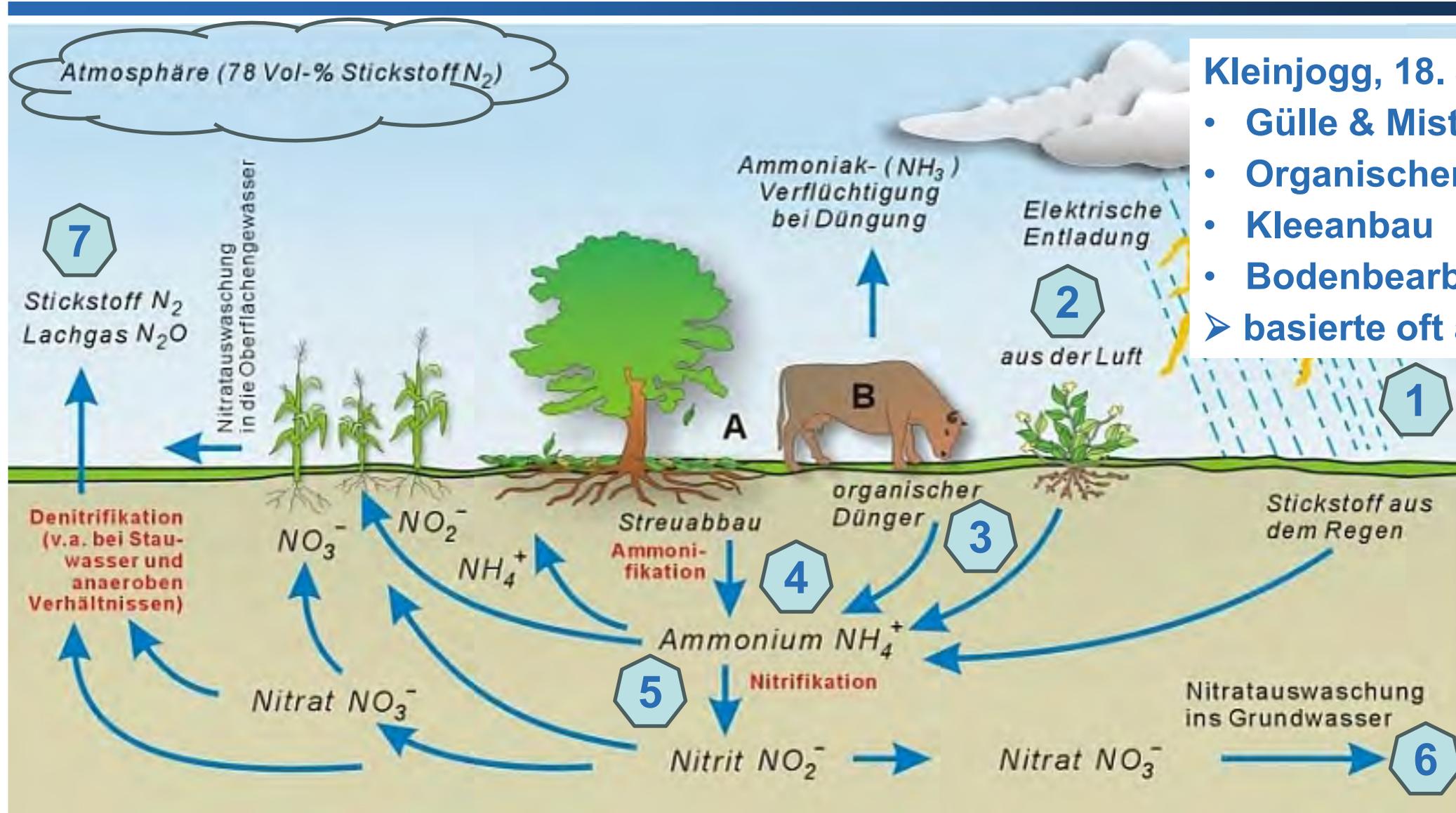


- Vollbauer eines Hofes in Wermatswil bei Uster mit fast 50 ha Acker, Grünland, Wald
- Ab 1769 Bewirtschafter des Hofes Katzenrüti mit 70 ha, von Zürcher Regierung ausgewählt
- Experimentierte mit besseren Anbaumethoden zu Zeiten der strikten Dreifelderwirtschaft, des Allmends, der Waldweiden und der «Egertenwirtschaft» (vgl. bar Brandrodung)

- Systemansatz
- Bauerngespräche im Rahmen der «Naturforschenden/Physikalischen Gesellschaft»
- International bekannt gemacht durch Hirzel
- Breite Masse der Bauern aber nicht erreicht, seiner Zeit voraus (erst nach 1816)



# Stickstoff-Kreislauf: komplex, dynamisch, spannend



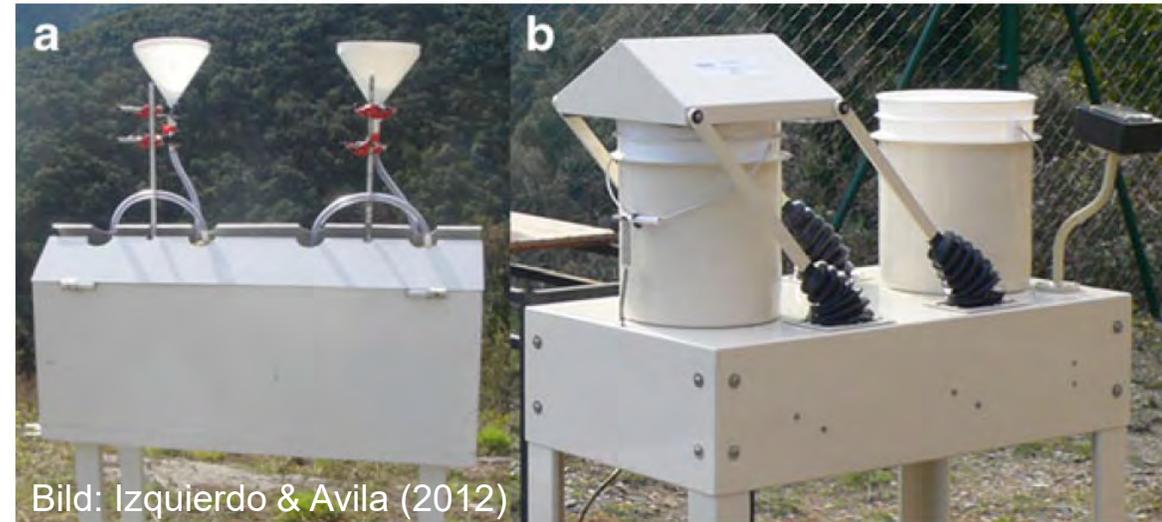
Kleinjogg, 18. Jhd.

- Gülle & Mist
- Organischer Dünger
- Kleeanbau
- Bodenbearbeitung
- basierte oft auf Stickstoff

# Einträge mit dem Regen

Wie messen?

- Regenmesser für die «nassen Einträge» mit Niederschlägen: Regen, Schnee (beheizter Regenmesser), Tau und Nebel (spezielle Methodik mit Fäden)
- «Trockene Einträge» mit Staub und Aerosolen, Gase
- Kontinuierliche Messungen an verschiedenen Standorten, Analytik im Labor



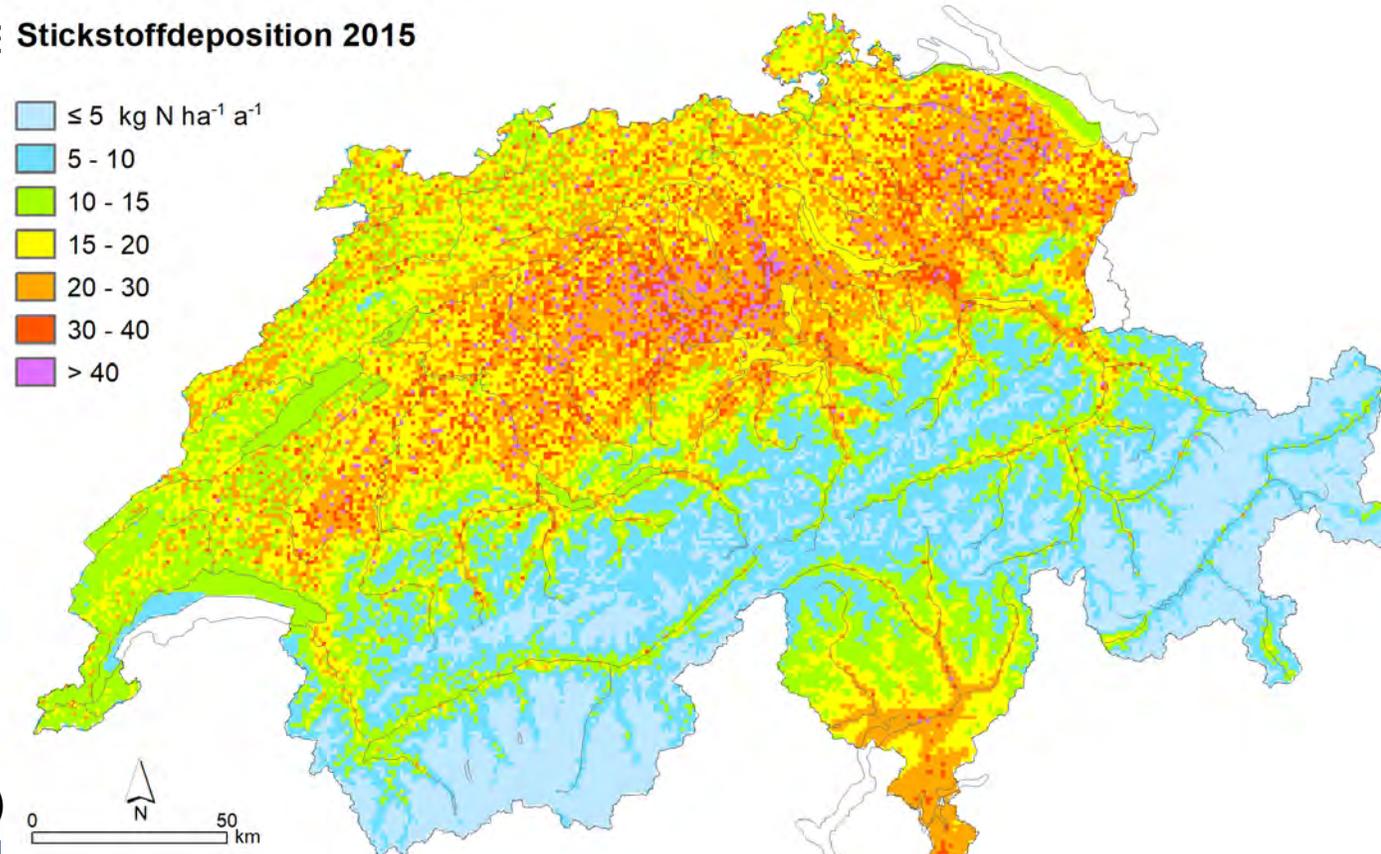
# Einträge mit dem Regen

Wie messen?

- Regenmesser für die «nassen Einträge» mit Niederschlägen: Regen, Schnee (beheizter Regenmesser), Tau und Nebel (spezielle Methodik mit Fäden)
- «Trockene Einträge» mit Staub und Aerosolen, Gase
- Kontinuierliche Messungen an verschiedene Standorten, Analytik im Labor

Messergebnisse?

- Räumlich sehr heterogen
- Einträge von  $< 5$  kg N pro Hektar und Jahr bis zu  $> 40$  kg N pro Hektar und Jahr
- Zu hoch für manche Pflanzengemeinschaften

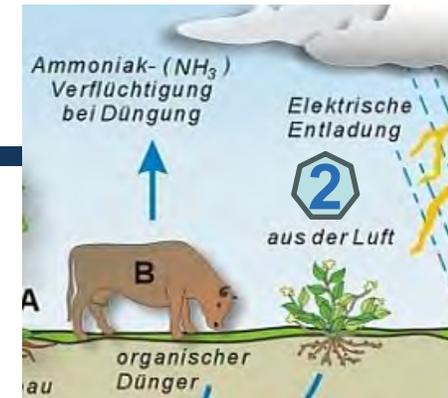


(Rihm & Achermann 2016)

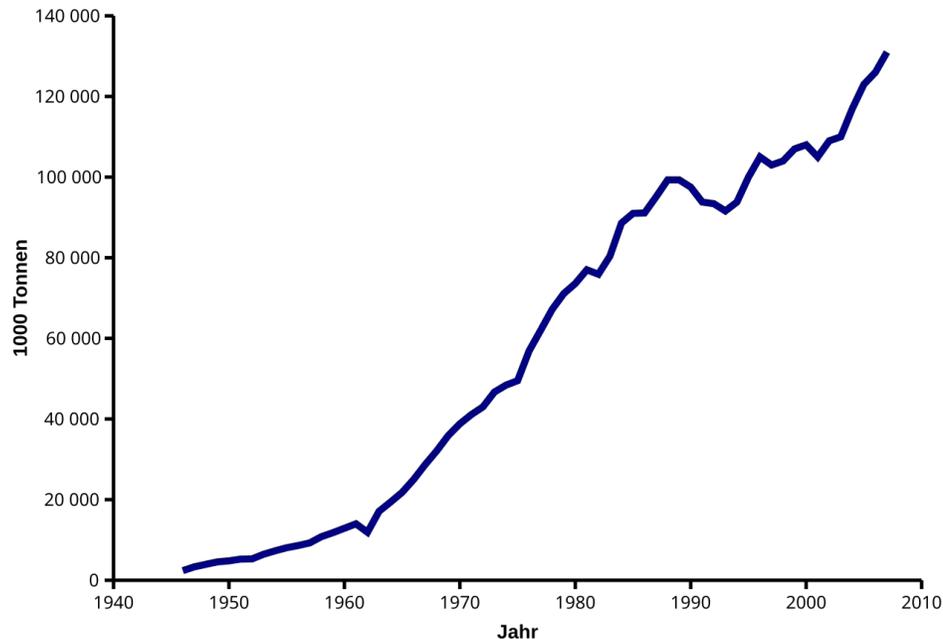
# Einträge durch Stickstoff-Fixierung

## Technische Fixierung: Haber-Bosch-Verfahren

- Unter hohen Drücken bei hohen Temperaturen wird Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) hergestellt  
$$\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{NH}_3$$
- Patent ging an BASF (Badische Anilin- und Sodafabrik) in Ludwigshafen
- 2010: 130 Millionen Tonnen  $\text{NH}_3$  → 80% für Düngemittel



Ammoniakproduktion 1946–2007 (als Stickstoff)



(BASF-Werk Ludwigshafen 1866)



(BASF-Werk Ludwigshafen 2017)

Grösstes zusammenhängendes Chemie-Areal der Welt: 10 km<sup>2</sup>

# Einträge durch Stickstoff-Fixierung

## Biologische Fixierung: Wurzel-Symbiose

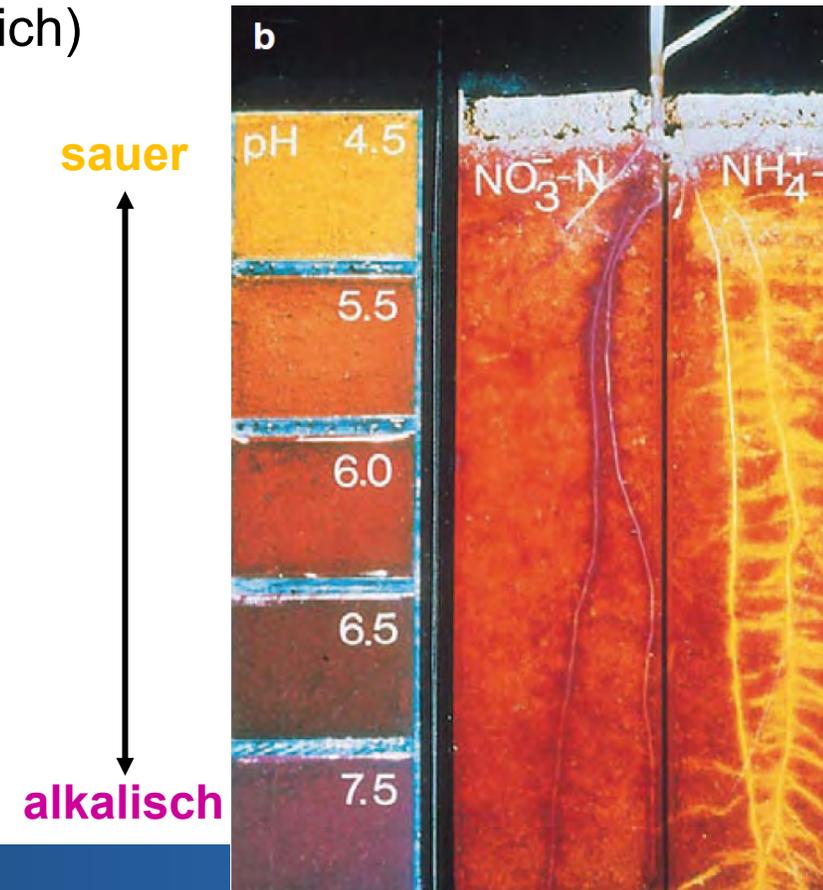
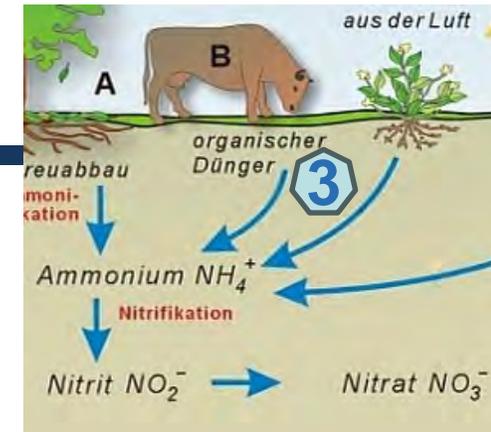
- Bakterien (Rhizobien) fixieren Stickstoff ( $N_2$ ) aus der Luft zu  $NH_3$   
$$N_2 + 8 e^- + 8 H^+ + 16 \text{ bis } 24 \text{ ATP} \rightarrow 2 NH_3 + H_2 + 16 \text{ bis } 24 \text{ ADP} + 16 \text{ bis } 24 P_i$$
  
 $NH_3$  (Ammoniak; toxisch)  $\rightarrow NH_4^+$  (Ammonium)  $\rightarrow$  Aminosäuren, Proteine, ...  
Fixierung braucht sehr viel Energie (ATP), die von Pflanze kommt  
Und: Pflanze versorgt Bakterien mit Kohlenhydraten
- In Wurzelknöllchen von Leguminosen (Familie: Fabaceae)
  - Gemüse (Erbsen, Bohnen)
  - Hülsenfrüchte (Linsen, Kichererbsen)
  - Ölsaaten (Erdnüsse, Sojabohnen)
  - Futtermittel (Klee, Luzerne)
- Fixierung kann zwischen 40 und 90% des Stickstoffs in den Leguminosen liefern



# Stickstoff-Aufnahme von Pflanzen (Nicht-Leguminosen)

## Aufnahme durch Wurzel als Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) oder Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ )

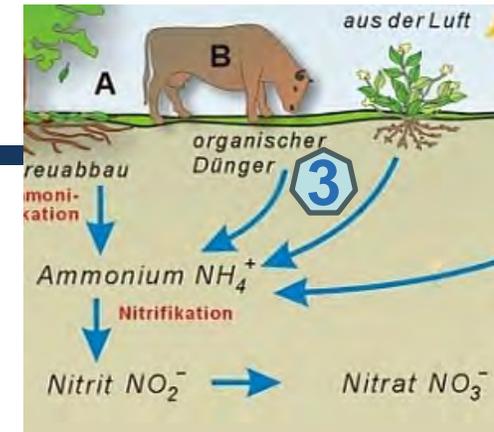
- Im Boden liegen beide Stickstoff-Formen vor
- Auswirkungen auf den Säurewert (pH-Wert) in Wurzelnähe (Rhizosphäre)
  - **Ammonium-Aufnahme**: pH sinkt, wird saurer (gelb)  
 $\text{NH}_4^+$  wird gegen  $\text{H}^+$  ausgetauscht (Ladungsausgleich)
  - **Nitrat-Aufnahme**: pH steigt (lila), wird alkalischer  
 $\text{NO}_3^-$  wird gegen  $\text{OH}^-$  ausgetauscht
- Je nach Angebot im Boden (Bodenlösung), werden von Pflanzen beide Formen aufgenommen



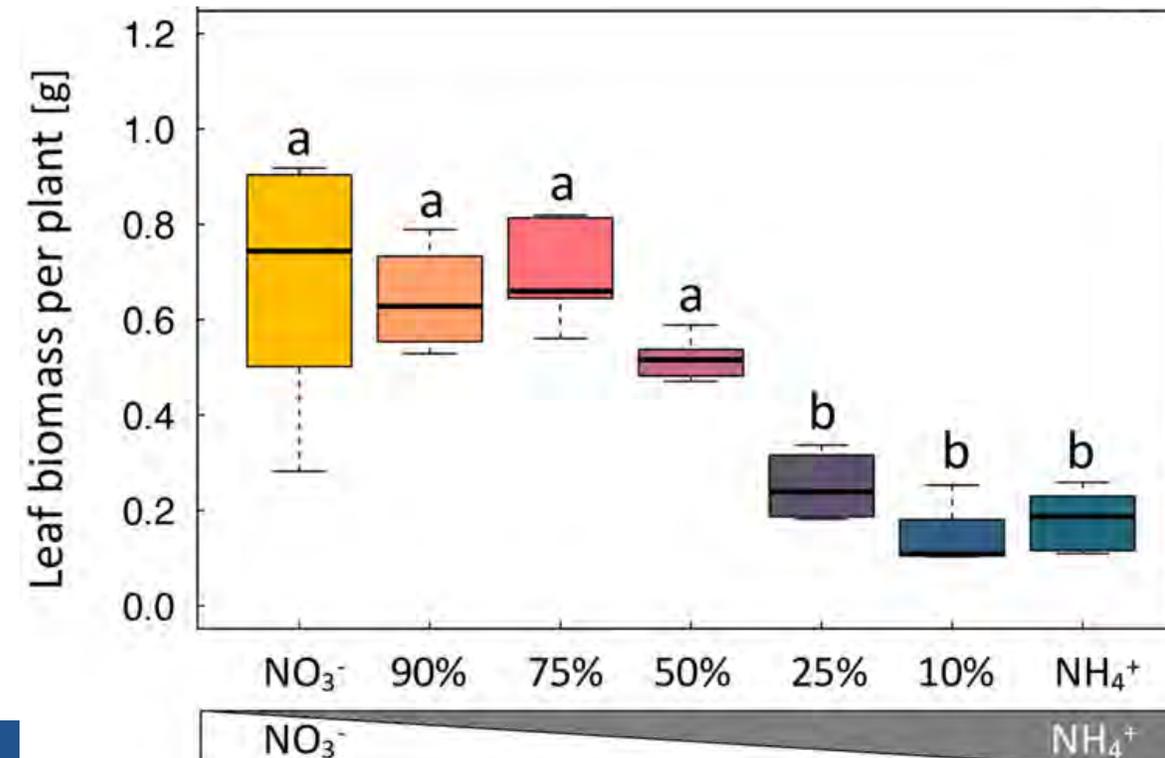
# Stickstoff-Aufnahme von Pflanzen (Nicht-Leguminosen)

## Aufnahme durch Wurzel als Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) oder Nitrate ( $\text{NO}_3^-$ )

- Im Boden liegen beide Stickstoff-Formen vor
- Auswirkungen auf den Säurewert (pH-Wert) in Wurzelnähe (Rhizosphäre)
  - Ammonium-Aufnahme: pH sinkt, wird saurer  
 $\text{NH}_4^+$  wird gegen  $\text{H}^+$  ausgetauscht
  - Nitrat-Aufnahme: pH steigt, wird alkalischer  
 $\text{NO}_3^-$  wird gegen  $\text{OH}^-$  ausgetauscht
- Je nach Angebot im Boden (Bodenlösung), werden auch beide Formen aufgenommen
- **Reine Ammonium-Ernährung führt bei vielen Pflanzen zu geringem Wachstum ☹**



Blatt-Wachstum

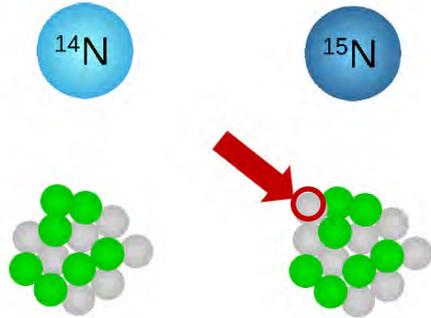
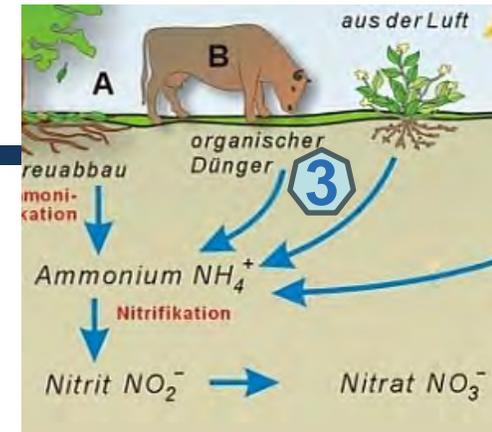


(Ghiasi et al. 2020)

# Profitieren Gräser von Leguminosen?

Wie messen?

- Element Stickstoff kommt in verschiedenen Formen (sog. Isotopen)
- Zusammensetzung wird mit einem Isotopen-Massenspektrometer gemessen



**Stickstoff-14**

99.64 %

7 Protonen

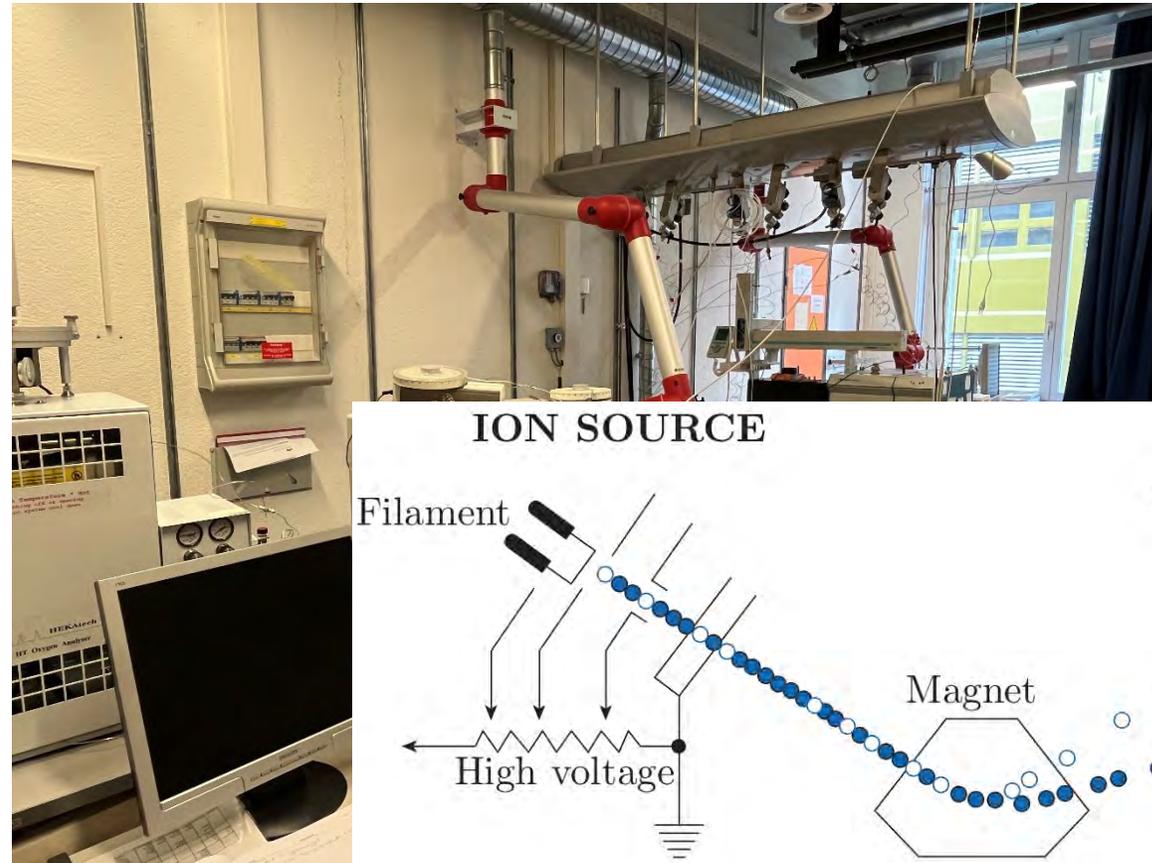
7 Neutronen

**Stickstoff-15**

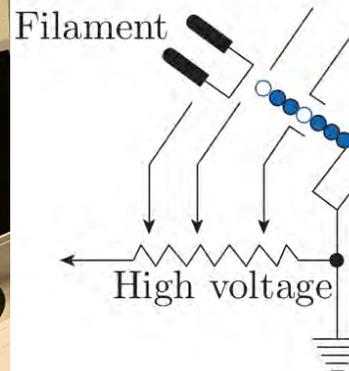
0.36%

7 Protonen

**8 Neutronen**

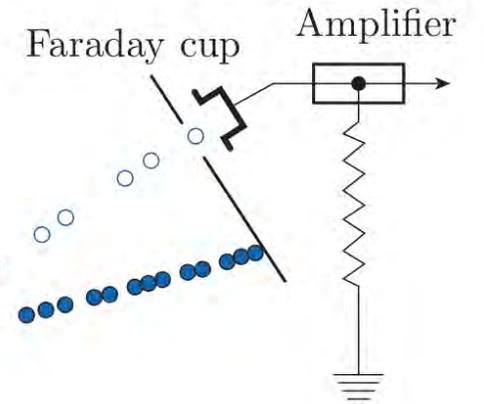


ION SOURCE

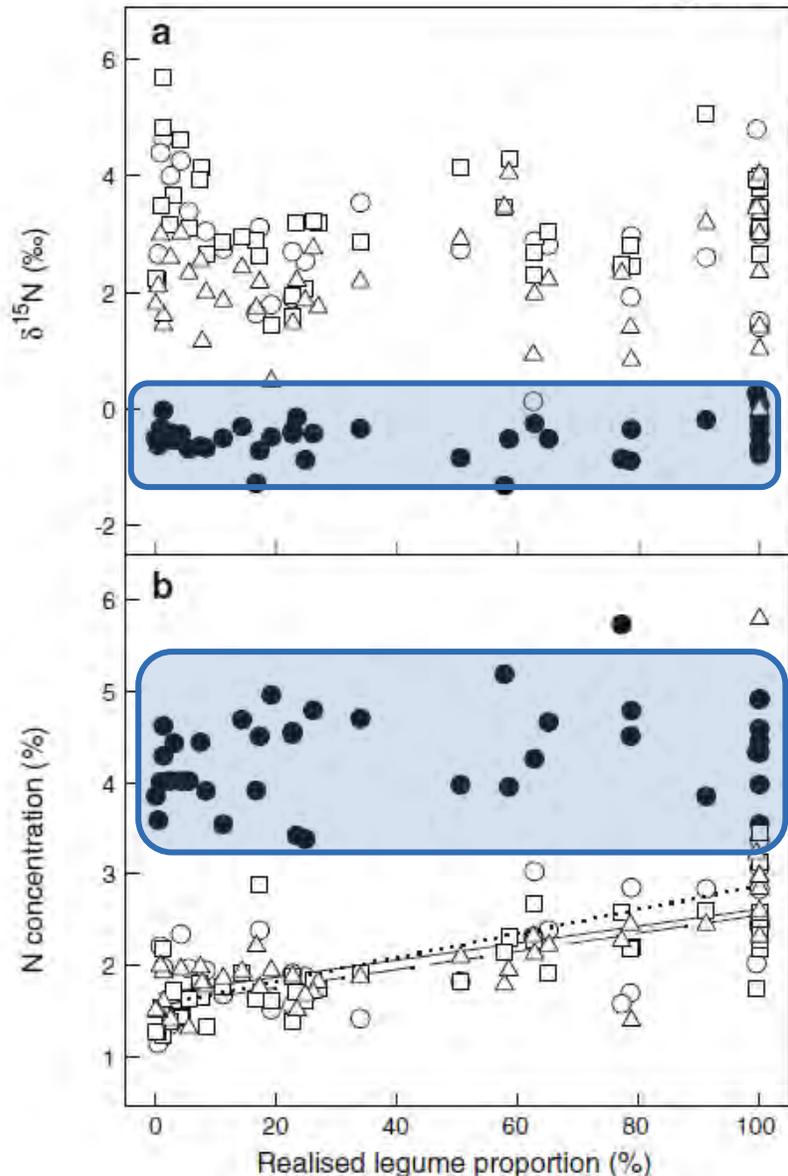


Magnet

COLLECTOR

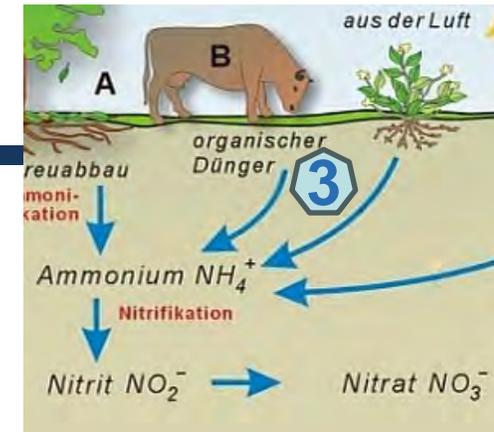


# Profitieren Gräser von Leguminosen? Ja

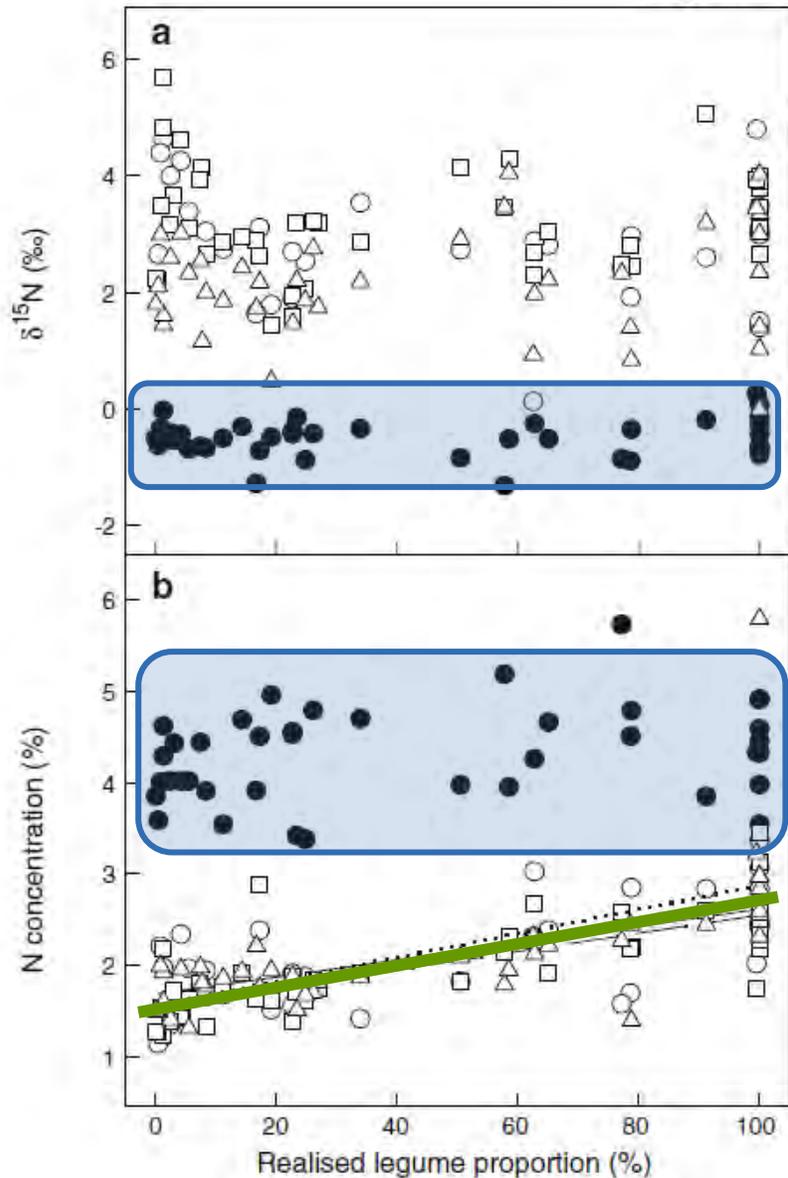


Hintergrund:

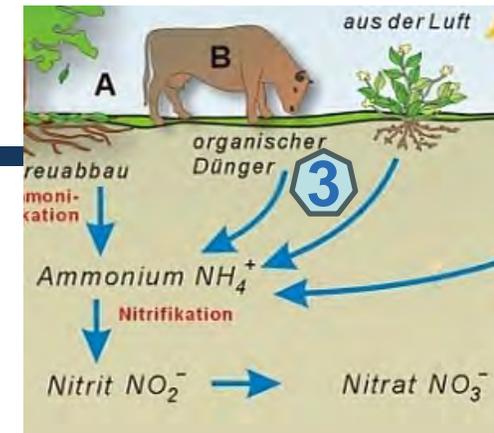
- Jeder chemische, physikalische oder biologische Prozess beeinflusst die Zusammensetzung des Stickstoffs in einem Molekül (sog. Fraktionierung).
  - Die Größenordnung der Fraktionierung ist bekannt → Herkunftsbestimmungen möglich
  - Bei der Stickstoff-Fixierung ist dieser Einfluss sehr gering.
- **Leguminosen:** Isotopensignatur ( $\delta^{15}\text{N}$ ) nahe Null, hohe Stickstoff-Konzentration in Blättern



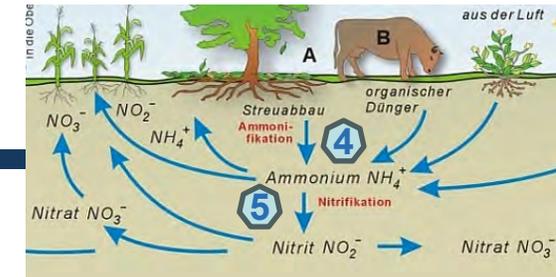
# Gräser profitieren von Leguminosen, ...



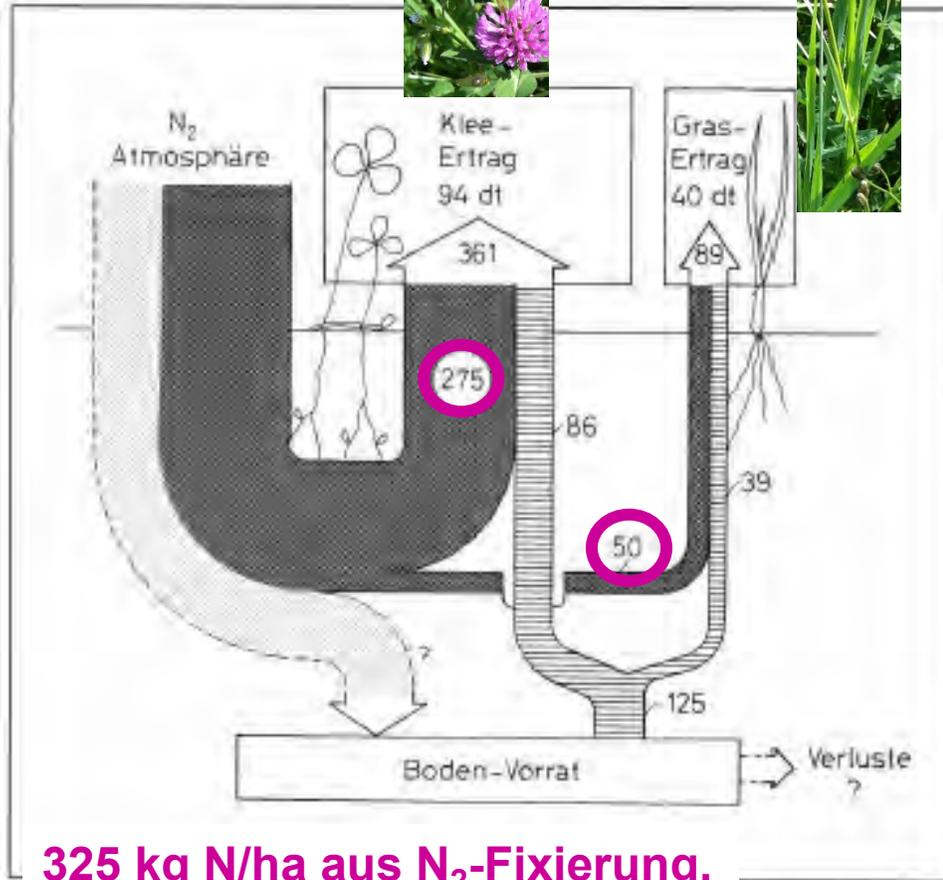
- **Leguminosen:** Isotopensignatur ( $\delta^{15}\text{N}$ ) nahe Null, hohe Stickstoff-Konzentration in Blättern
- **Gräser:** höhere Stickstoff-Konzentration bei höherer Leguminosen-Beimischung
- **Schweiz: Wiesen und Weiden sind immer Mischungen: Gras, Klee (Leguminose) und Kräuter**



# ... Bauer/Bäuerin profitiert auch ...



Ungedüngt



Gedüngt



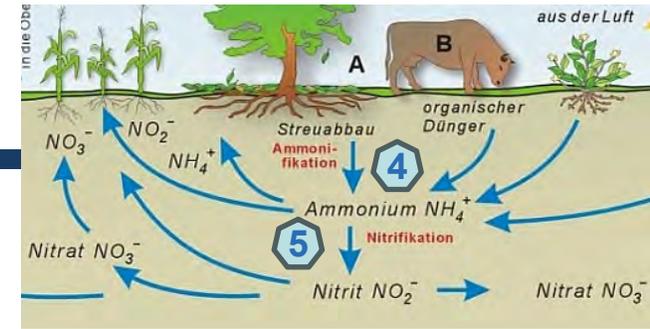
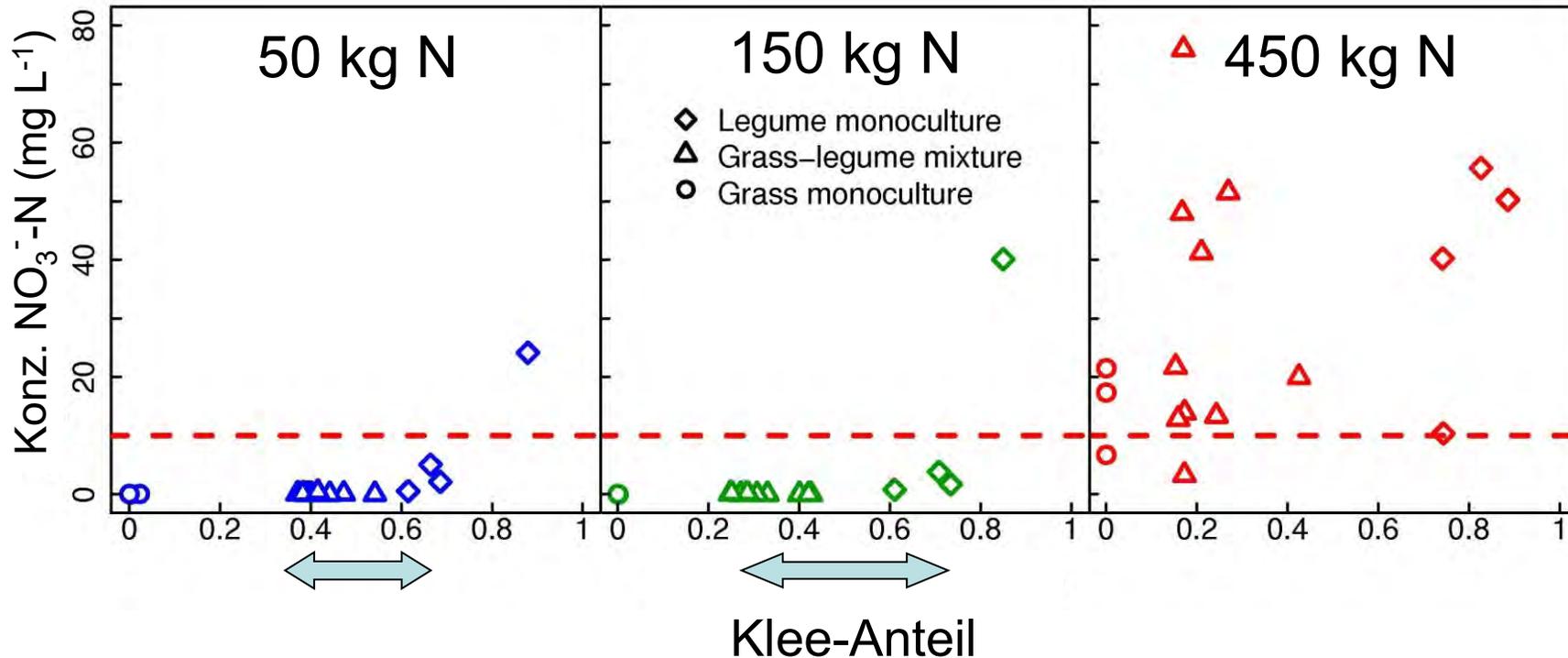
325 kg N/ha aus N<sub>2</sub>-Fixierung,  
keine Düngung

228 kg N/ha aus N<sub>2</sub>-Fixierung,  
150 kg N/ha aus Düngung,  
85 kg N/ha Verlust

Leguminosen:  
ersetzen N-Dünger,  
weniger N Verluste,  
ähnliche Erträge

➤ **Mischungen:**  
durch Biodiversität  
viele Vorteile

# ... die Umwelt profitiert auch !



**Nitrat-Auswaschung** ist gering, wenn

- N-Düngung < 150 kg N pro Hektar und Jahr und Leguminosen-Anteil < 80 %

# Daher: Ziel im Wiesenbau in der Schweiz

## Der Zielbestand

**50–70 % Gräser**  
(z.B. Italienisches oder  
Englisches Raigras,  
Wiesenfuchsschwanz,  
Wiesenrispengras,  
Knautgras, Kammgras  
u.a.)



**10–30 % Kleearten**  
(z.B. Weissklee oder Rotklee)

**10–30 %  
Futterkräuter**  
(z.B. Löwenzahn,  
Kriechender  
Hahnenfuss,  
Frauenmantel u.a.)

### Wiesenpflanzen

- Je nach Wiesentyp
- Standortangepasst
- Ausdauernd und stabil
- Robust und regenerierfähig
- Nutzungselastisch

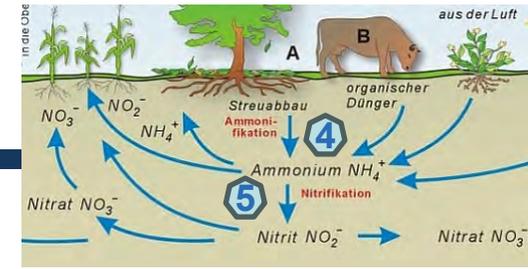
### Grasnarbe

- Günstig zusammengesetzt
- Dicht
- Trittfest
- Gut befahrbar

### Anfallendes Futter

- Ertragreich
- Gehaltreich
- Bekömmlich
- Schmackhaft
- Vielseitig verwendbar

# Was tun, wenn Bestand nicht gut genug?



Umbruch und Neuansaat, alle 5-7 Jahre im Dauergrünland, in der Schweiz und in Europa



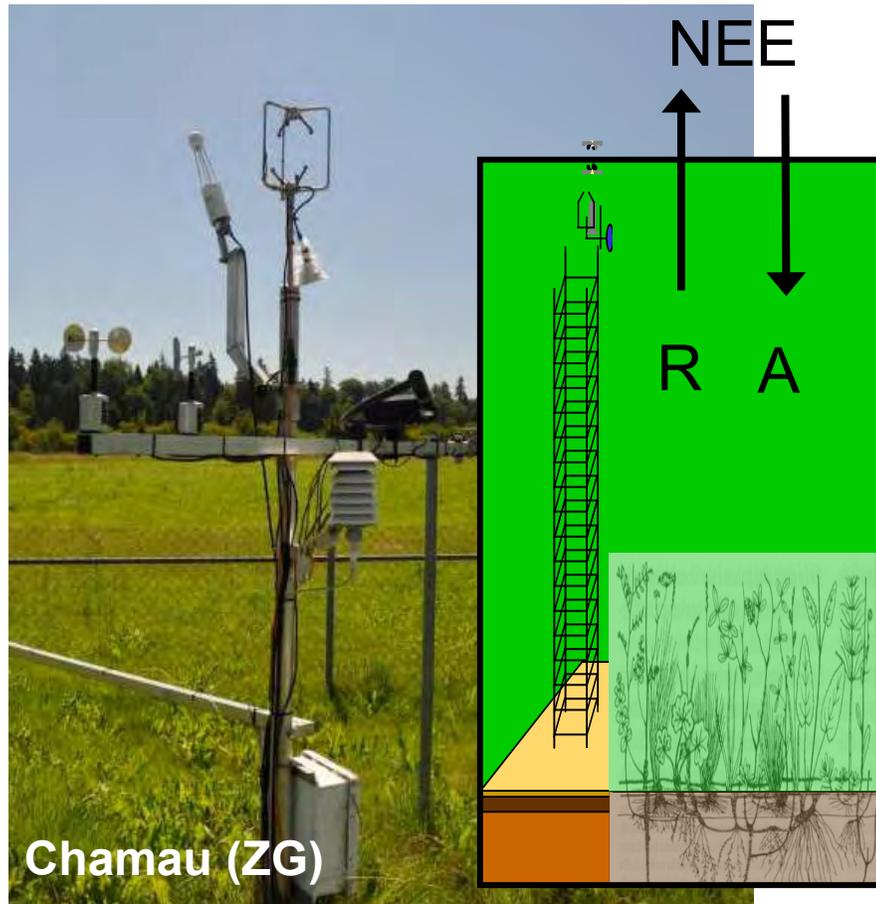
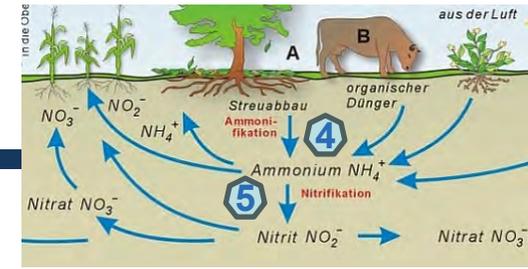
Chamau (ZG), Aug. 2021



Chamau (ZG), Okt. 2021

# Was passiert bei Umbruch und Neuansaat?

Wie messen? Mit einer mikro-meteorologischen Methode (**Eddy-Kovarianz-Technik**) für Treibhausgase, wie Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ),  $\text{H}_2\text{O}$ -Dampf, Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ )



NEE = Netto- $\text{CO}_2$ - Austausch

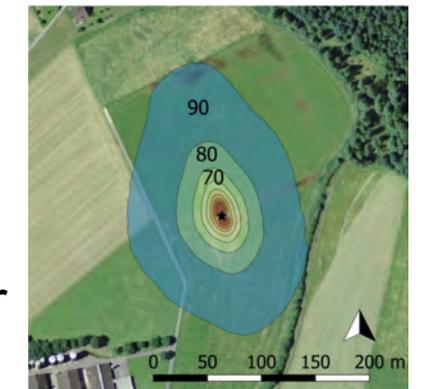
R = Atmung

A = Assimilation (Photosynthese)

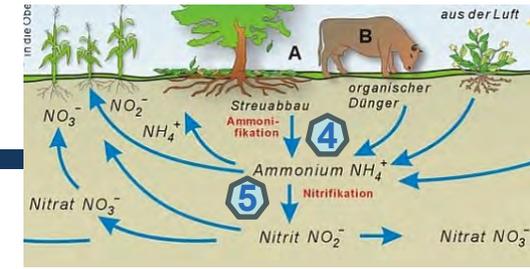
- $\text{CO}_2$  Senke: Assimilation  $\gg$  Atmung
- $\text{CO}_2$  Quelle: Atmung  $\gg$  Assimilation
- Kontinuierliche Messungen (20 Hz, 24 h/Tag, 7 Tage/Woche, 365 Tage/Jahr, mehrere Jahre/Dekaden)
- Räumliche Integration über Wiese, Acker oder Wald



(swisstopo; modell Klijun et al. 2015)

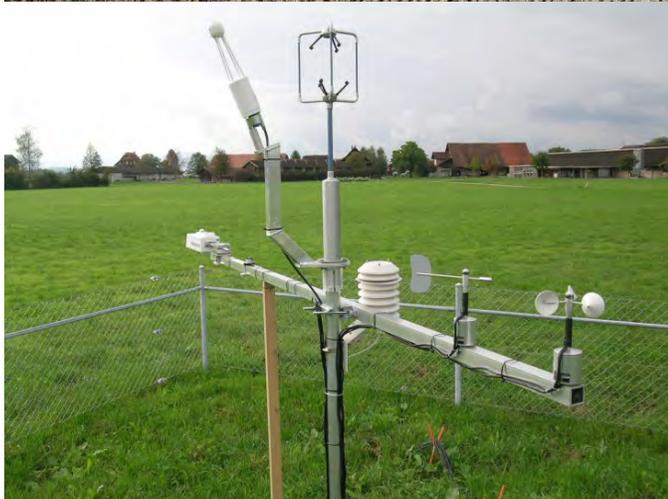


# Was passiert bei Umbruch und Neuansaat?



Messergebnisse von Chamau, 400 m ü. M.

- intensives Management (5-6 Schnitte pro Jahr, entsprechende Düngung mit Gülle)



Jahr des Umbruchs	CO <sub>2</sub> -C	CH <sub>4</sub> -C	<b>N<sub>2</sub>O-N</b>	GHG fluxes
g m <sup>-2</sup>	339	2.65	2.91	
g CO <sub>2</sub> -eq. m <sup>-2</sup>	1245	88	1363	2696
%	<b>46.2</b>	<b>3.3</b>	<b>50.6</b>	<b>100</b>

Normales Jahr	CO <sub>2</sub> -C	CH <sub>4</sub> -C	N <sub>2</sub> O-N	GHG fluxes
g m <sup>-2</sup>	-655	1.44	0.28	
g CO <sub>2</sub> -eq. m <sup>-2</sup>	-2398	65	131	-2202
%	<b>92.3</b>	<b>2.6</b>	<b>5.1</b>	<b>100</b>

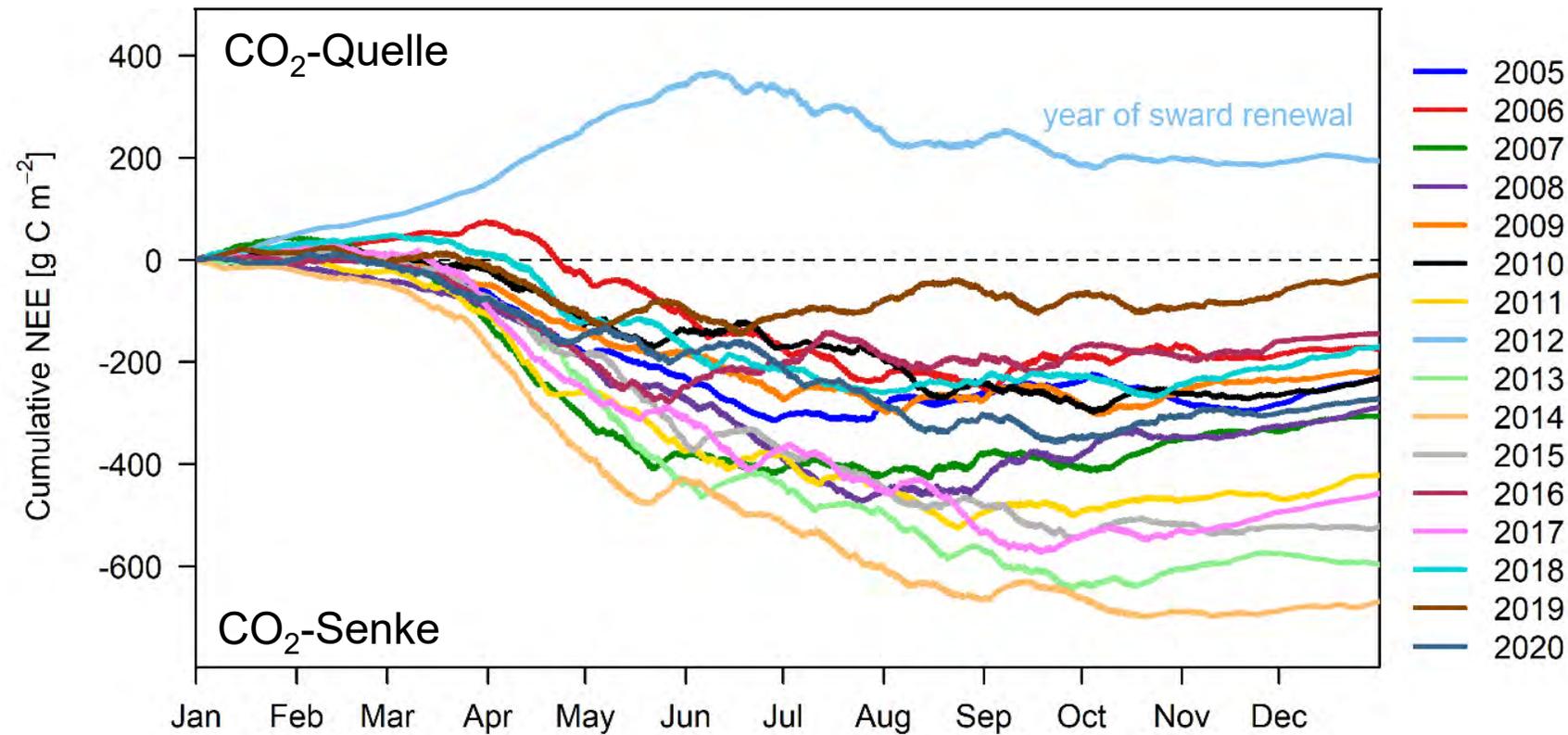
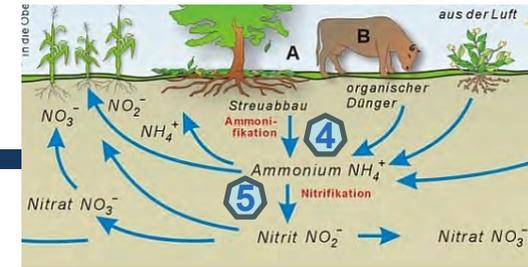
➤ extrem hohe N<sub>2</sub>O-Verluste

(Merbold et al. 2014)

# Was passiert bei Umbruch und Neuansaat?

Messergebnisse von Chamau, 400 m ü. M.

- intensives Management (5-6 Schnitte pro Jahr, entsprechende Düngung mit Gülle)

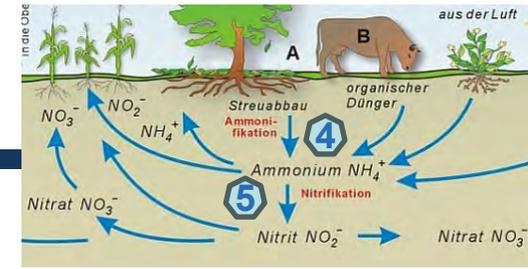


**2012: Hohe  $\text{CO}_2$ -Verluste ➤  $\text{CO}_2$ -Quelle anstatt  $\text{CO}_2$ -Senke**

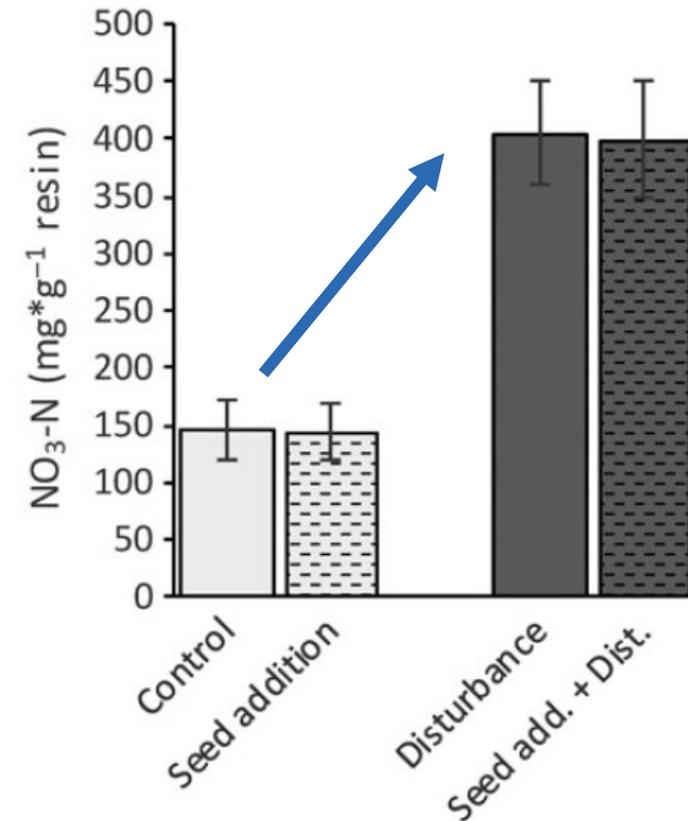
(Feigenwinter et al. 2023)

# Was passiert bei Umbruch und Neuansaat?

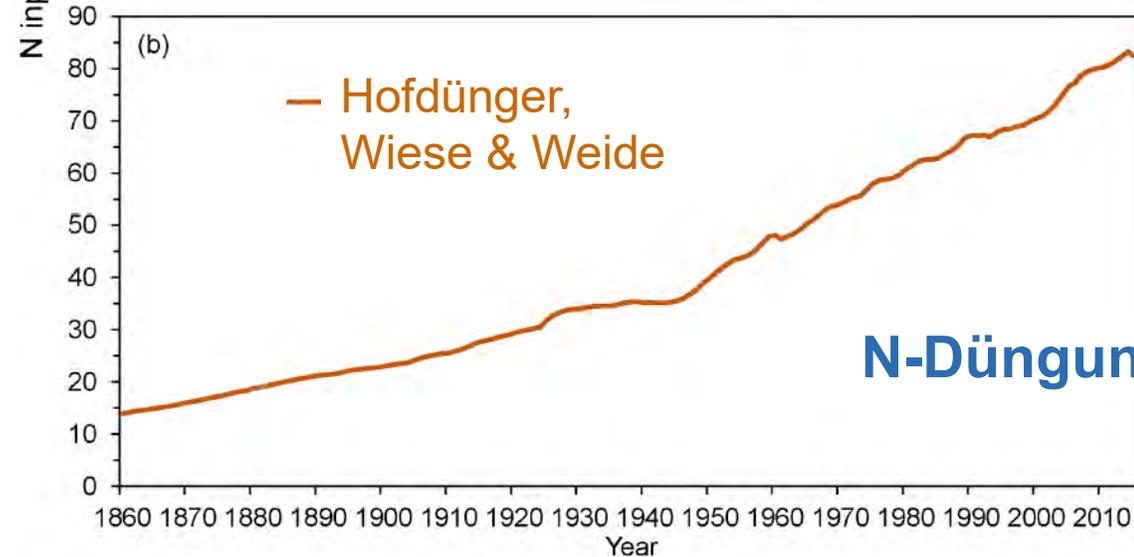
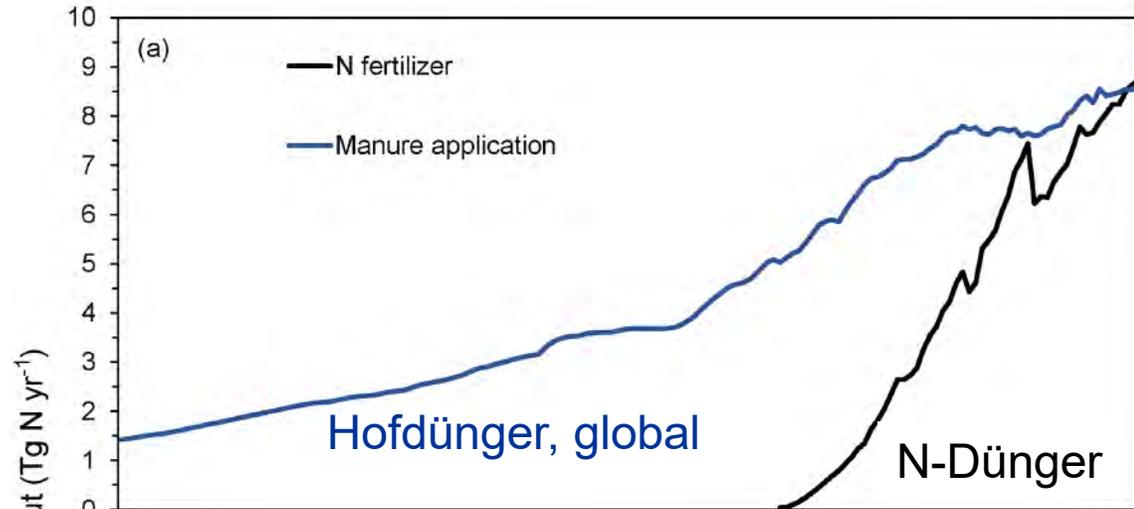
- Gefahr der Nitrat-Verluste
- **Möglichst selten umbrechen, Direktsaat, Probleme im Vorfeld vermeiden**



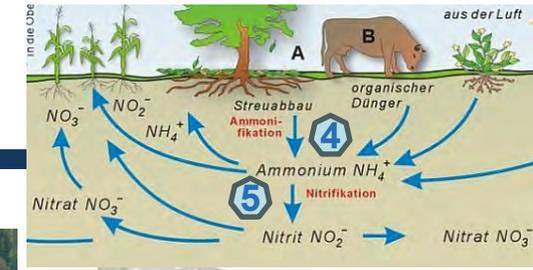
Ansaat mit regionaler  
Saatgutmischung ändert  
Auswaschungsgefahr nicht



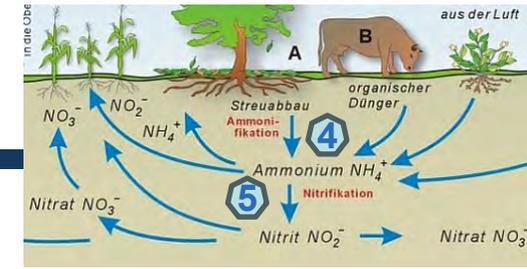
# Was passiert bei Stickstoff-Düngung?



**N-Düngung ist global angestiegen**



# Was passiert bei Stickstoff-Düngung?

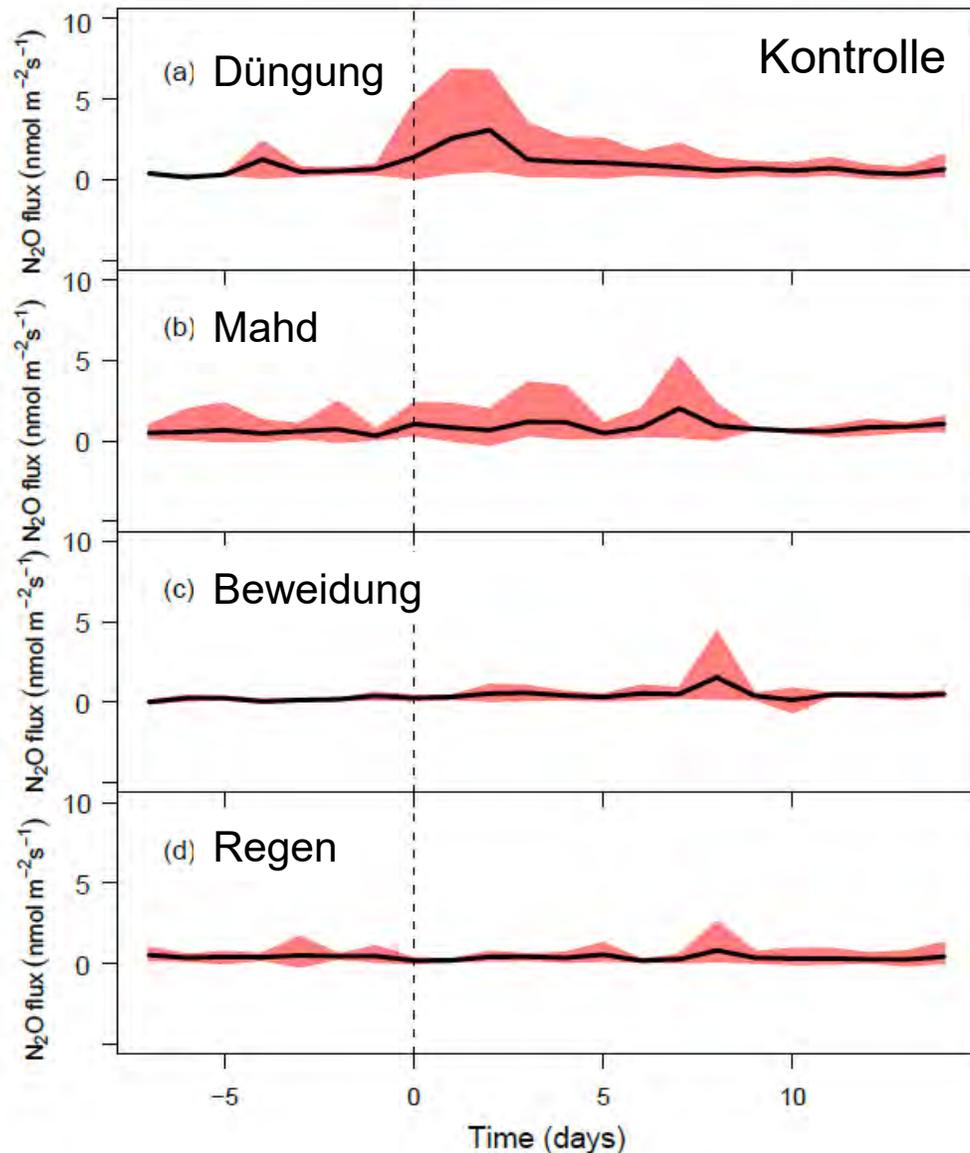


Hintergrund:

- Wiese wird regelmässig gemäht, danach mit Hofdünger gedüngt
- Messungen der Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ )-Flüsse mit der Eddy-Kovarianz-Technik

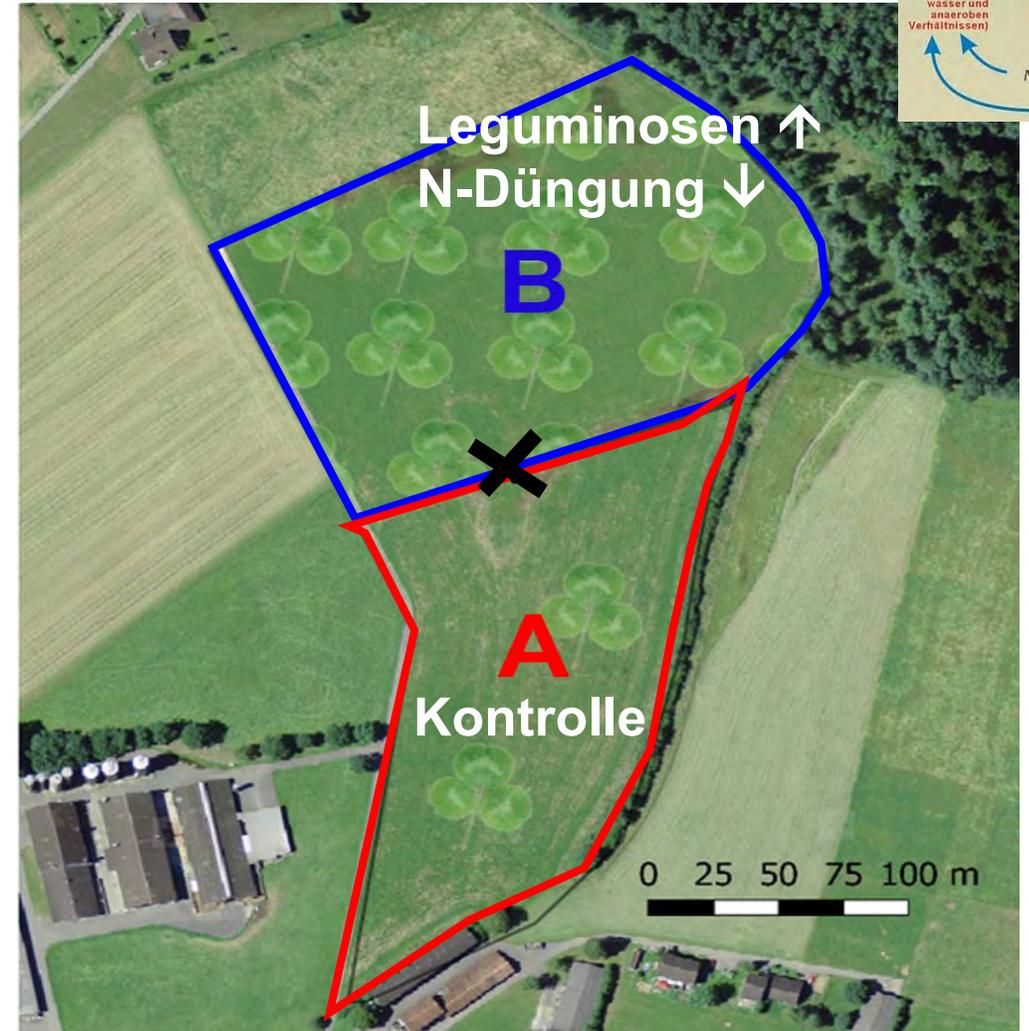
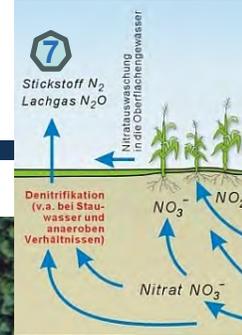
Messergebnisse:

- **N-Düngung führt zu sehr hohen Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ )-Verlusten (N-Verfügbarkeit für Bakterien  $\uparrow$ )**
- Mahd erhöht die Verluste geringfügig, klar weniger stark als Düngung (fehlende Wurzelaufnahme)
- Beweidung und Regen führen nur zu kleinen Verlusten (Störung des Bodens, Umwelteinflüsse)



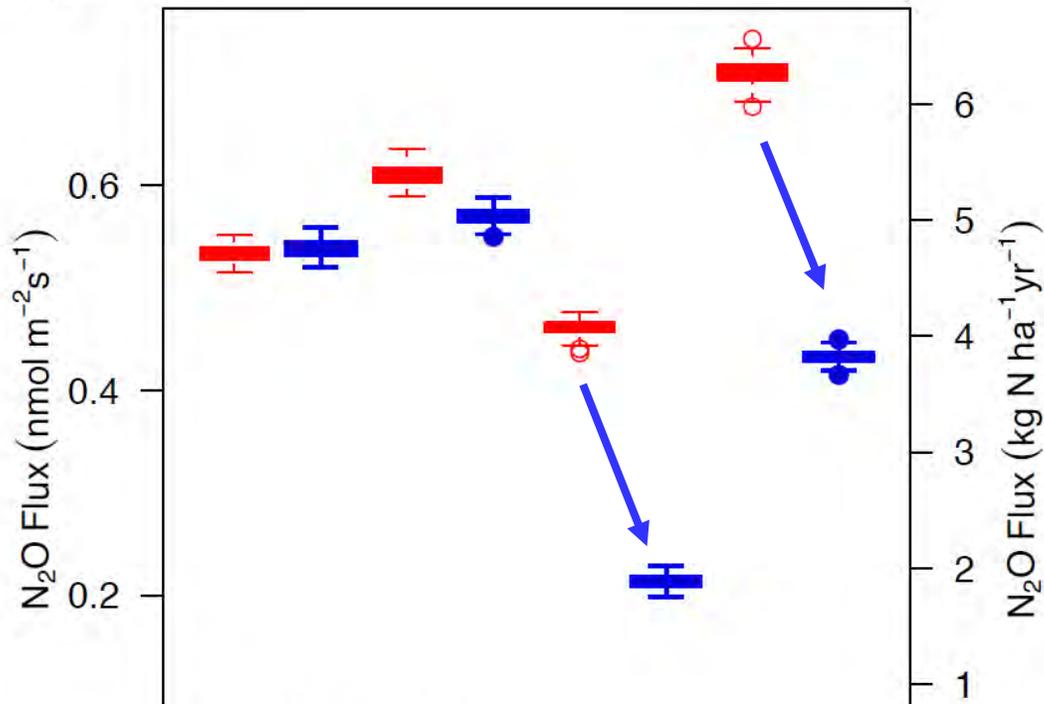
(Fuchs et al. 2018)

# Können $N_2O$ -Verluste mit Leguminosen verringert werden?!



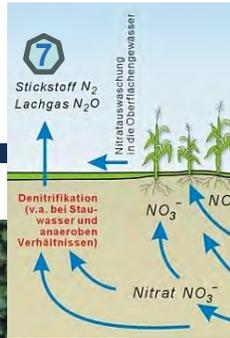
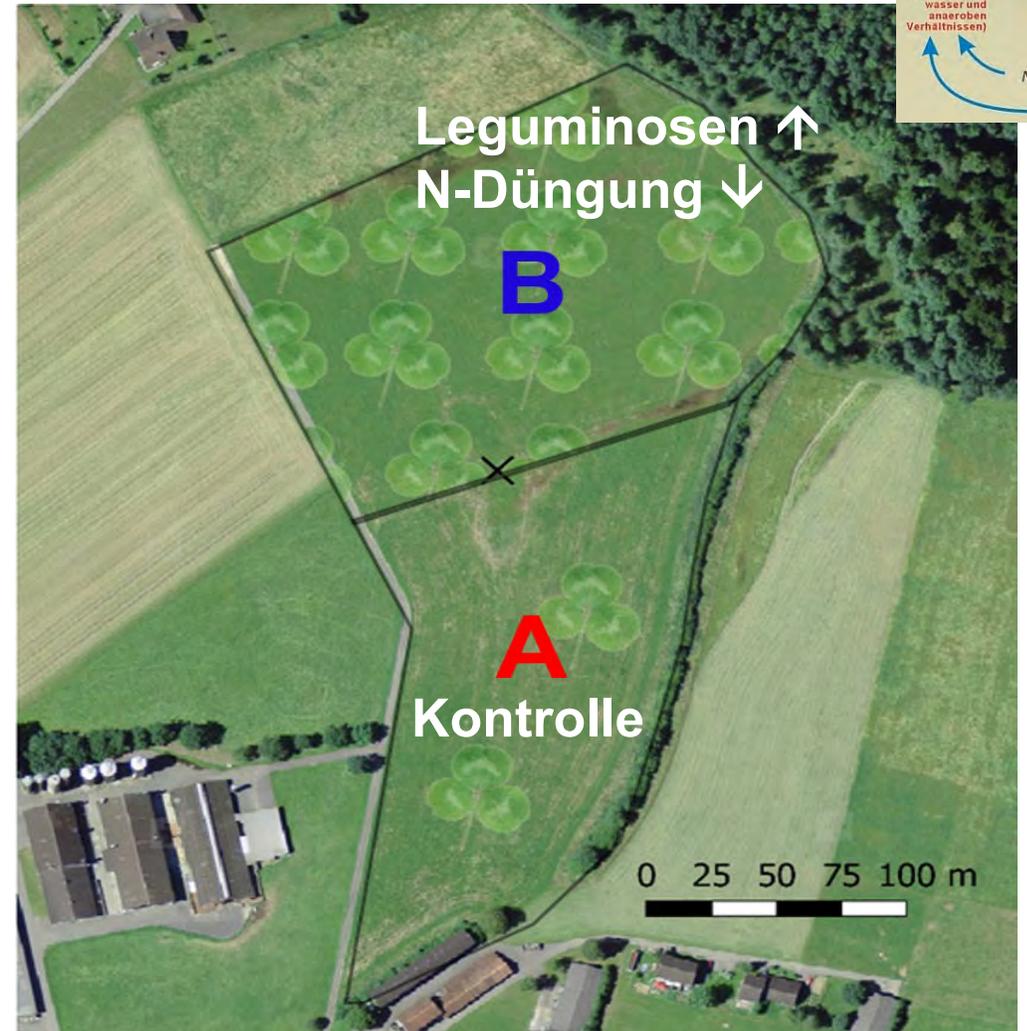
(Fuchs et al. 2018)

# Leguminosen zur Senkung der N<sub>2</sub>O-Verluste? Ja!



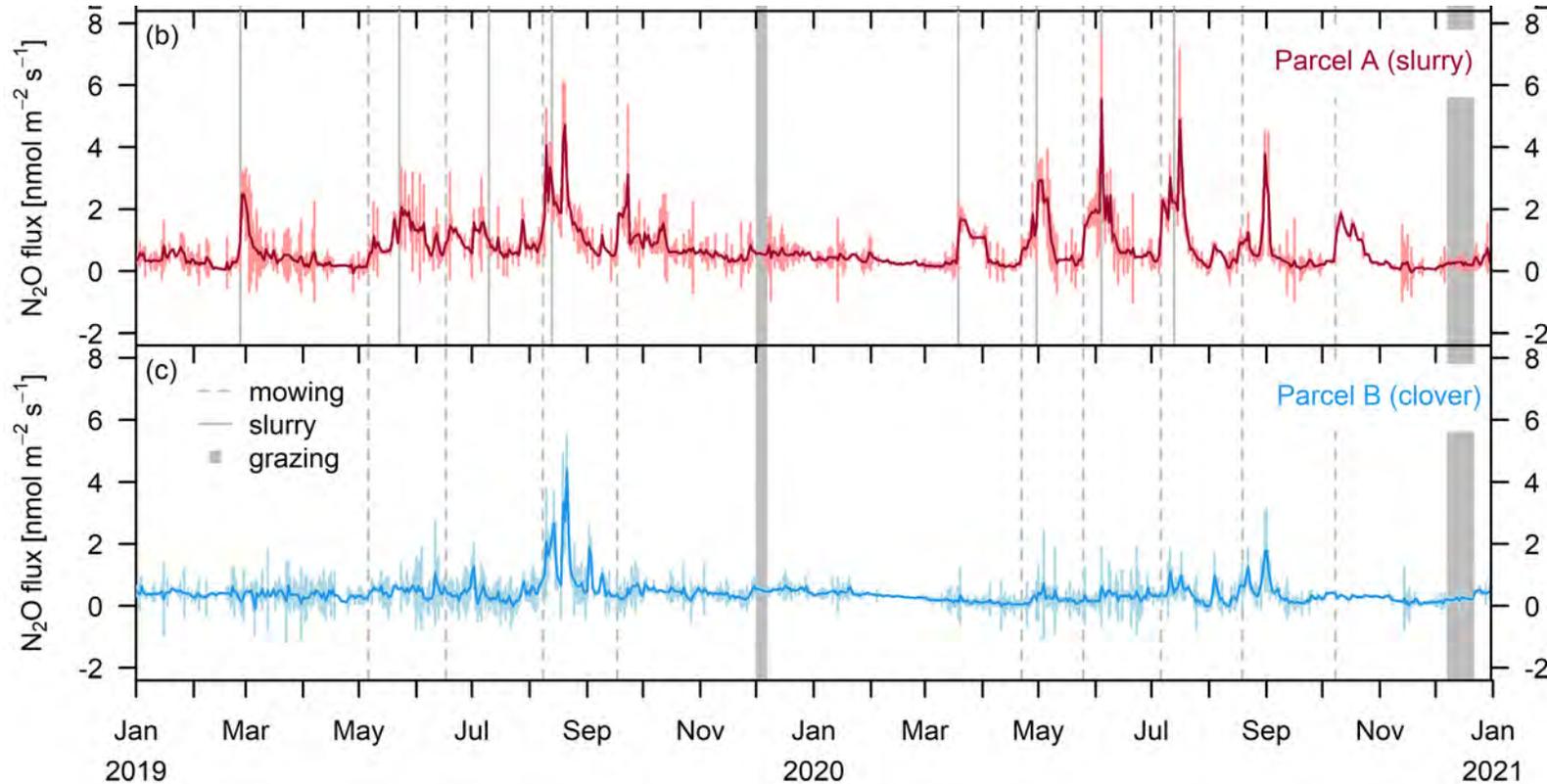
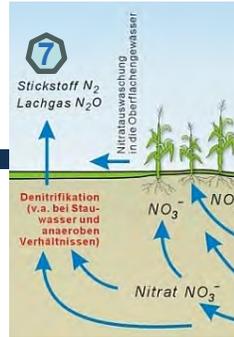
Höherer Anteil von Leguminosen in der Wiese:

- 40-50 % weniger N<sub>2</sub>O-Emissionen
- 10 % geringere Erträge, aber höhere Qualität
- Förderung der Artenvielfalt



(Fuchs et al. 2018)

# Langfristige Senkung der N<sub>2</sub>O-Verluste? Ja!



## Gedüngte Kontrolle (Gülle):

2019: 6.9 kg N<sub>2</sub>O -N ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>

2020: 5.9 kg N<sub>2</sub>O -N ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>

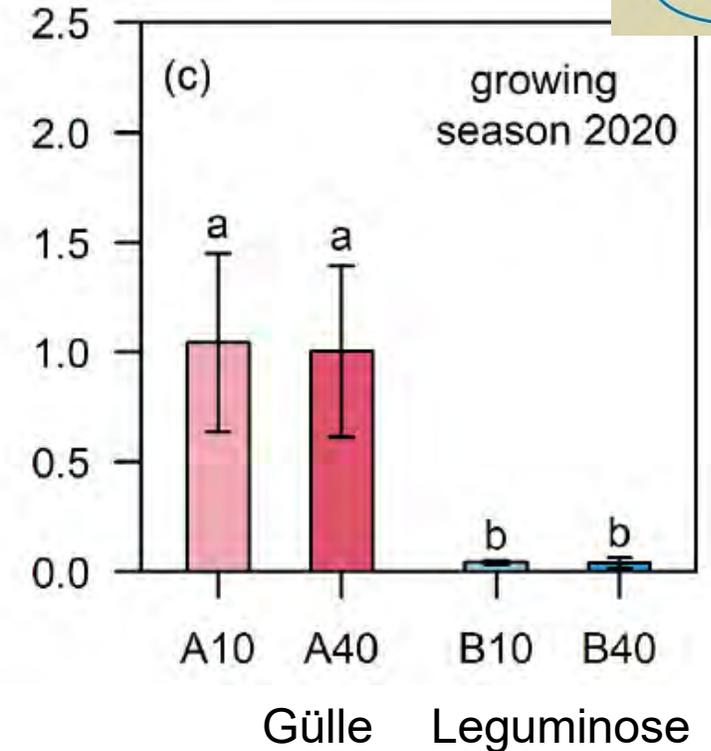
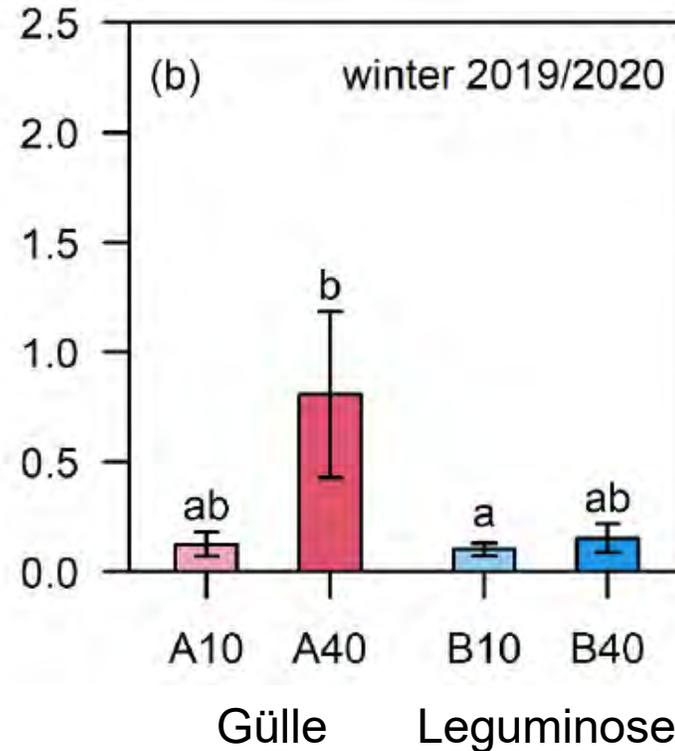
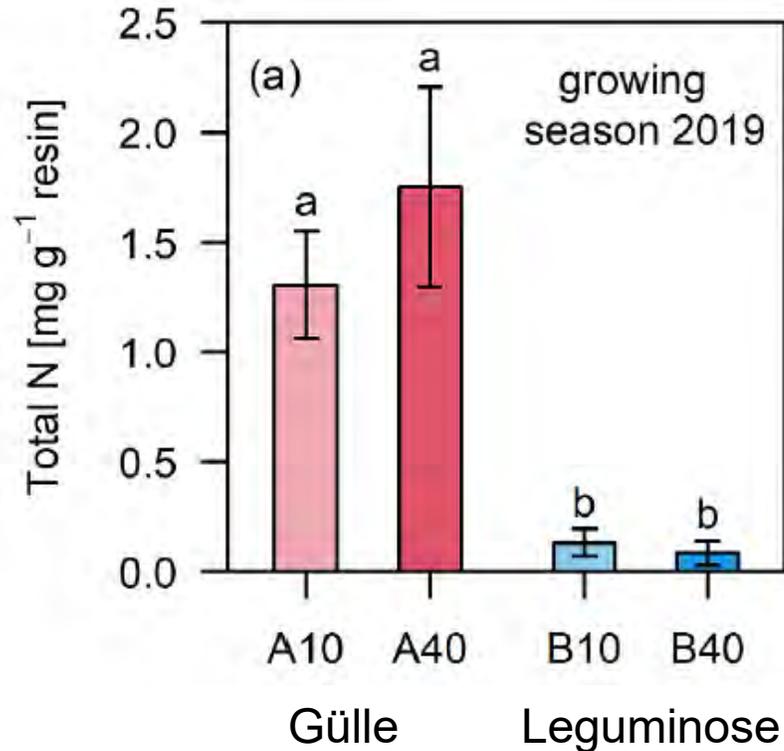
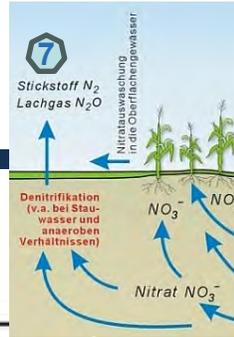
## Leguminosen-Parzelle:

2019: 4.4 kg N<sub>2</sub>O -N ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>

2020: 2.7 kg N<sub>2</sub>O -N ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>

- Ergebnisse sind robust: in späteren Jahren 36 bis 54 % weniger N<sub>2</sub>O-Emissionen
- Aber in sehr trockenen Jahren: 30 % niedrigere Erträge in Leguminosen-Parzelle

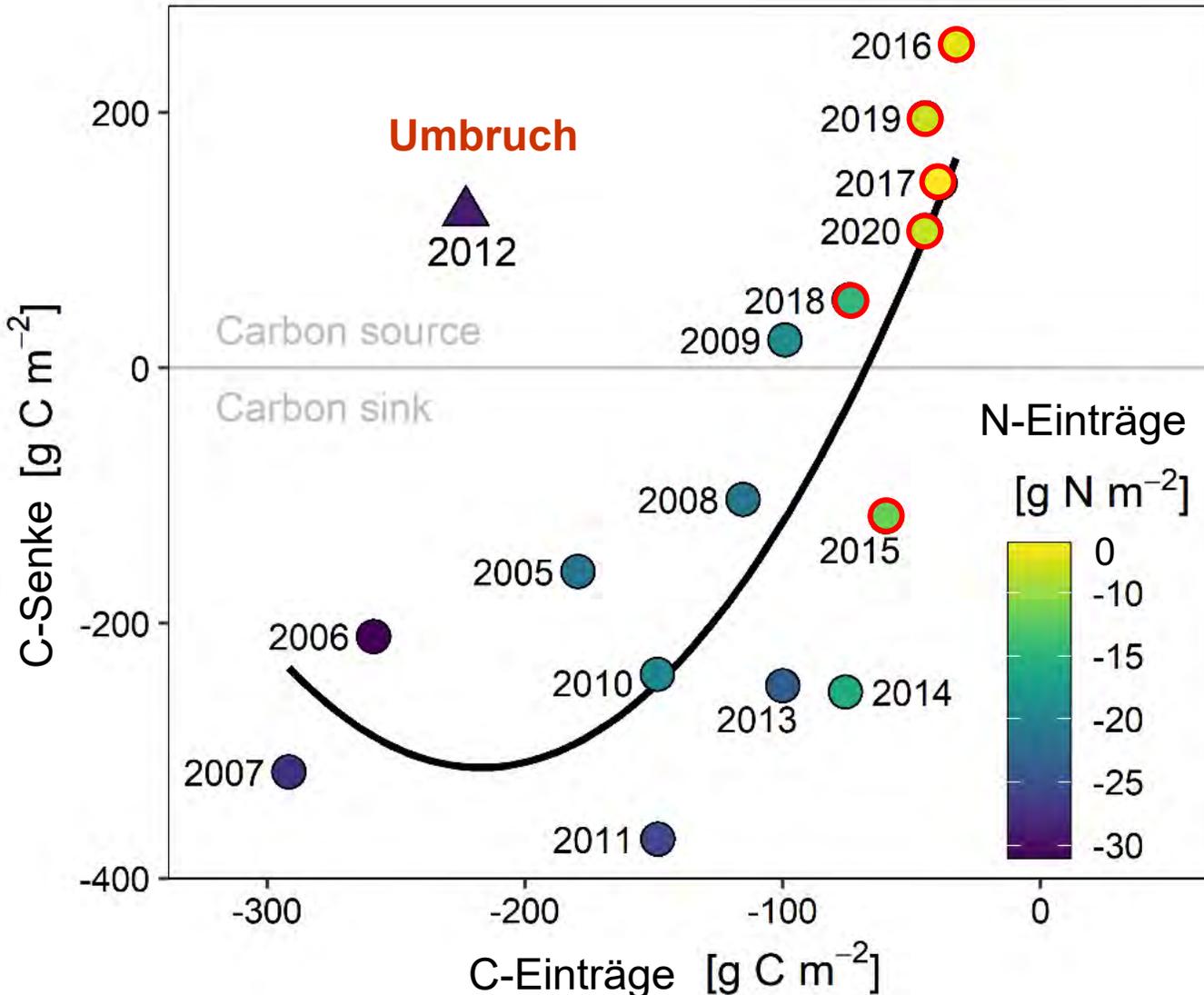
# Weitere Effekte? Reduzierte Nitratauswaschung!



- Erhöhter Leguminosen-Anteil reduziert  $NO_3^-$ -Auswaschung im Vergleich zur organischen Düngung

# Gibt es nur positive Wirkungen? Nein!

7

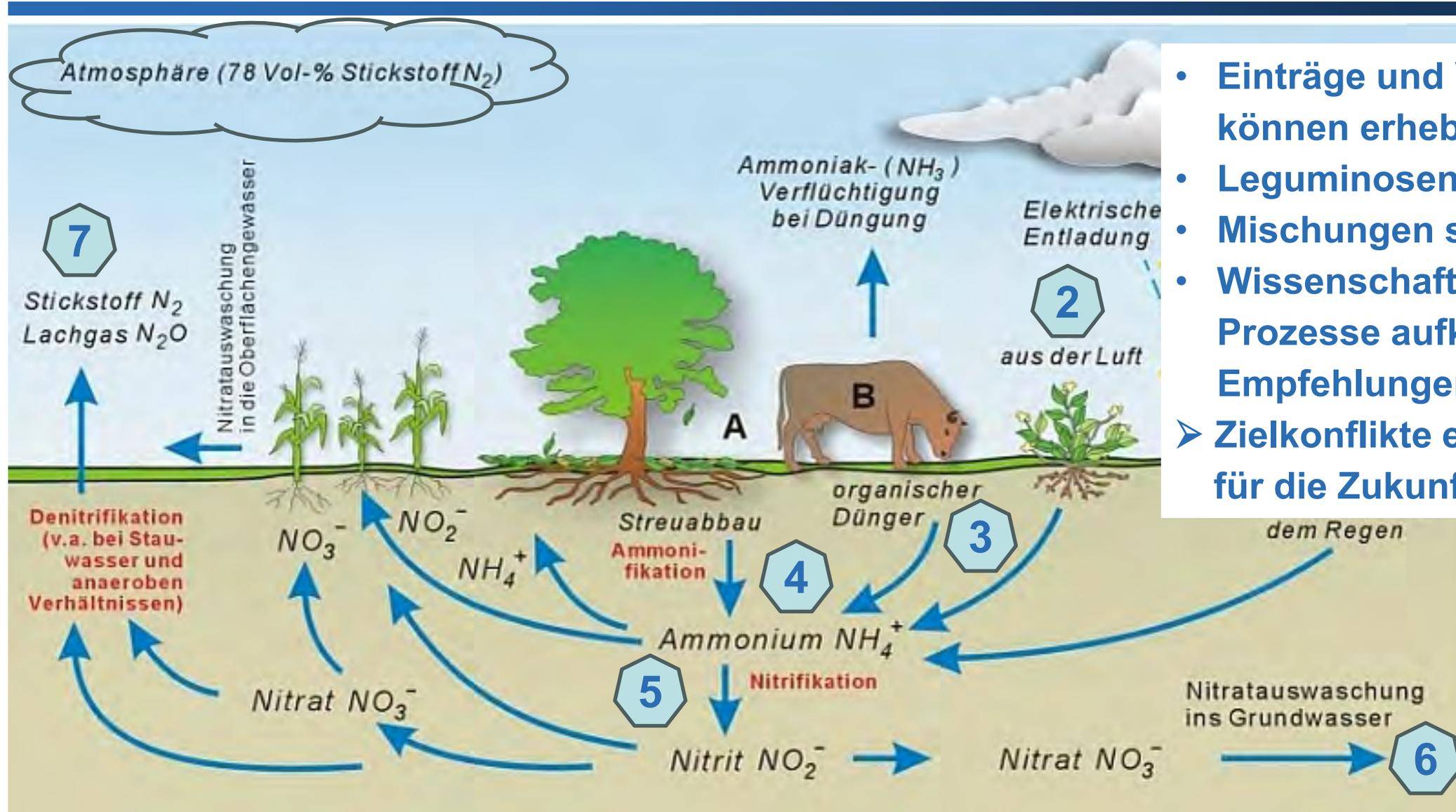


○ Jahre mit höherem Leguminosen-Anteil und ohne organische Düngung

- Ohne ausreichende organische C-Einträge in Form von Gülle, d.h. C und N, wird Wiese zu einer C-Quelle
- **Zielkonflikte** für eine klimafreundliche Landwirtschaft, die noch gelöst werden müssen (z. B. biologische Nitrifikationshemmer)

(Feigenwinter et al. 2023)

# Stickstoff-Kreislauf: komplex, dynamisch, spannend



- Einträge und Verluste können erheblich sein
- Leguminosen sind toll ;-)
- Mischungen sind toll !
- Wissenschaft kann viele Prozesse aufklären und Empfehlungen geben
- Zielkonflikte erkennen und für die Zukunft lösen



**Motor des Lebens: Die Bedeutung des Stickstoff-Kreislaufs für unseren Planeten !**

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit**