Welche (industriellen) Arbeitsschritte wären notwendig, um aus dem Kohlenstoff der Methan-Pyrolyse Terra-Preta zu erzeugen und wieviel zusätzliche Energie (zur Pyrolyse) wäre dafür erforderlich?

Für die industrielle Umwandlung von Kohlenstoff aus der Methan-Pyrolyse (oft als **„Carbon Black"** bezeichnet) in Terra Preta müssen die Porenstruktur angepasst und Nährstoffe angelagert werden. Für den Umwandlungsprozess ist keine zusätzliche Hochtemperatur-Pyrolyseenergie erforderlich, sondern es fallen primär biologische und mechanische Prozessschritte an. [1, 2]

Notwendige industrielle Arbeitsschritte

1. **Strukturierung und Porositätsanpassung:**
   Reiner Kohlenstoff aus der Methan-Pyrolyse ist extrem fein und weist oft nicht die schwammartige, poröse Struktur auf, die für Terra Preta typisch ist. Der Kohlenstoff muss mit Bindemitteln (z.B. Lignin, Melasse oder Biomasse-Reststoffen) pelletiert oder agglomeriert werden, um ein poröses, fruchtbares Bodengranulat zu schaffen. [2]
2. **Aufmahlung und Mischung (Homogenisierung):**
   Die Pellets oder Pulver werden mit mineralischen Zuschlagstoffen, wie beispielsweise Gesteinsmehl (zur Mineralisierung und pH-Stabilisierung), vermengt. [3, 4]
3. **Biologische Aktivierung ("Aufladung"):**
   Reiner Kohlenstoff entzieht dem Boden zunächst Nährstoffe. Daher muss er mit organischen Nährstoffen beladen werden. Dies geschieht industriell in Bioreaktoren oder großen Kompostieranlagen, in denen der Kohlenstoff mit Biomasse (z.B. Gärresten aus Biogasanlagen, Tiermist oder Grünschnitt) fermentiert und kompostiert wird. [1, 4, 5, 6]
4. **Fermentation (Bokashi-Prozess):**
   Der eigentliche Terra-Preta-Effekt entsteht durch die Fermentation unter Beigabe von Mikroorganismen (Effektive Mikroorganismen, EM) über einen Zeitraum von mehreren Wochen bis Monaten, wodurch ein stabiler Dauerhumus gebildet wird. [1, 3]

Zusätzlicher Energiebedarf

Der energetische Mehraufwand ist im Vergleich zur vorgeschalteten Methan-Pyrolyse gering und betrifft vor allem mechanische und logistische Prozesse, da die Verkohlung bereits abgeschlossen ist: [1, 7]

- **Thermischer Energiebedarf: Nahezu Null.** Die Aktivierung und Fermentation laufen bei Umgebungstemperaturen oder niedriger Prozesswärme (unter

60°C) ab. Die Energie dafür kann aus der Abwärme der vorgeschalteten Pyrolyse oder von Biogasanlagen gedeckt werden. [8, 9, 10]
- **Elektrischer Energiebedarf:** Gering. Dieser wird benötigt für das Mahlen, Pelletieren, Mischen und den Betrieb von Kompostwender/Bioreaktoren. Der Wert liegt typischerweise bei etwa 30 bis 100kWh pro Tonne Kohlenstoff (abhängig vom gewünschten Granulierungsgrad). [11, 12]

Um den Prozess exakter zu planen, teilen Sie mir gerne Folgendes mit:

- **Welche Ausgangsstoffe** (z.B. Gärreste, Grünschnitt, Tiermist) stehen Ihnen für die Biomasse-Mischung zur Verfügung?
- **Welche Zielanwendung** (z.B. großflächige Landwirtschaft oder Gartenbau) streben Sie an?

[1] https://www.oekologisches-wirtschaften.de
[2] https://hr-online-system.uni-hohenheim.de
[3] https://www.triodos.de
[4] https://keep-it-gruen.de
[5] https://www.youtube.com
[6] https://hr-online-system.uni-hohenheim.de
[7] https://nachhaltigwirtschaften.at
[8] https://www.sonnenerde.at
[9] https://fv-terrapreta.de
[10] https://www.bmluk.gv.at
[11] https://www.sfc.com
[12] https://keep-it-gruen.de

Muss zusätzlicher Stickstoff zugeführt werden?

Ja, für die Herstellung von Terra Preta muss zwingend zusätzlicher Stickstoff zugeführt werden.

Reiner Kohlenstoff aus der Methan-Pyrolyse besitzt ein extrem hohes Kohlenstoff-zu-Stickstoff-Verhältnis (C:N-Verhältnis) und wirkt im Boden wie ein Schwamm, der vorhandenen Stickstoff blockiert. Ohne zusätzliche Stickstoffzufuhr kommt es zur sogenannten **Stickstoffimmobilisierung**, wodurch Pflanzen verkümmern. [1]

Notwendige Stickstoffmengen und Quellen

Um den Kohlenstoff pflanzenverfügbar zu "aktivieren", wird ein stabiles C:N-Verhältnis von etwa **10:1 bis 15:1** im fertigen Terra-Preta-Substrat angestrebt. Folgende industrielle Stickstoffquellen kommen dafür infrage:

- **Organische Reststoffe**: Gärreste aus Biogasanlagen, Tiermist (Geflügelkot, Gülle) oder Klärschlamm eignen sich ideal, da sie während der Fermentation biologisch gebunden werden.
- **Mineralische Dünger**: Ammoniumsulfat oder Harnstoff können für eine präzise, industrielle Skalierung beigemischt werden, um das C:N-Verhältnis exakt einzustellen.

Möchten Sie den Prozess eher mit **organischen Reststoffen** (z.B. aus der Landwirtschaft) oder über **synthetische Stickstoffdünger** realisieren?

[1] https://nutrinorm.de

Müssen die Pflanzen für hohen Ertrag dann zusätzlich zur Verwendung dieser Terra-Preta dann noch mit Stickstoffdünger behandelt werden? Wieviel Energieaufwand über alles (Pyrolyse und mechanisch-biologische Nachbehandlung) fällt gegenüber der klassischen Kunstdüngerproduktion an? Wie sehen die CO2-Bilanzen aus? Da das Methan als nahezu natürliches Produkt ohnein im Antroprozän noch ewig anfallen wird (auch künstlich durch Biogas) und dringend beseitigt werden muss, auch nicht verbrannt werden sollte (-> CO2), wäre das nicht mittelfristig besser, als teure CCS-Verfahren aufzubauen?

1. Notwendigkeit zusätzlicher Stickstoffdüngung bei Pflanzen

Nein, wenn die Terra Preta im Vorfeld korrekt hergestellt und biologisch vollständig „geladen“ (aktiviert) wurde, müssen die Pflanzen **nicht** zusätzlich mit Stickstoffdünger behandelt werden.

- **Funktionsweise**: Die fertige Terra Preta fungiert als hocheffizienter **Langzeit-Nährstoffspeicher**. Der Stickstoff, der während des mechanisch-biologischen Nachbehandlungsprozesses (z. B. durch Gärreste) eingebracht wurde, ist stabil in der Porenstruktur der Kohle sowie in der neu gebildeten Humusmatrix gebunden. [1, 2, 3]

- **Nährstoffabgabe**: Mikroorganismen im Boden lösen diese Nährstoffe bedarfsgerecht und biologisch verfügbar für die Pflanze auf. Eine zusätzliche mineralische Düngung ist für hohe Erträge in den Folgejahren obsolet, da der eingebaute Kohlenstoff das Auswaschen von Stickstoff verhindert. [1, 2, 4]
-

---

2. Energieaufwand im Vergleich zur klassischen Kunstdüngerproduktion

Die Kombination aus Methan-Pyrolyse und biologischer Nachbehandlung ist energetisch **deutlich im Vorteil** gegenüber der klassischen Herstellung von synthetischem Stickstoffdünger (Haber-Bosch-Verfahren).

Prozesskette	Energieaufwand (thermisch + elektrisch)	Primärenergieträger / Charakter
Klassischer Kunstdünger (Haber-Bosch + Harnstoffsynthese)	**10 bis 12MWh** pro Tonne fixiertem Stickstoff	Extrem erdgasintensiv (hoher Druck & hohe Temperaturen zur Wasserstoffgewinnung via SMR)
Methan-Pyrolyse + Terra-Preta-Aufbereitung	**2,5 bis 4,5MWh** pro Tonne Kohlenstoff	"Türkiser" Wasserstoff als Hauptprodukt; benötigt ca. **75–90% weniger Energie** als die Wasserelektrolyse

- **Der energetische Hebel**: Die Pyrolyse von Methan benötigt thermodynamisch nur etwa **38kJ/mol H_2** (während die Spaltung von Wasser 285kJ/mol erfordert). Da die anschließende biologische Aktivierung der Terra Preta (Mischen, Kompostieren) mit rund **0,03 bis 0,1MWh/t** rein mechanisch abläuft, bleibt die Gesamtbilanz hocheffizient. [5, 6]

---

3. Vergleich der CO_2-Bilanzen

- **Klassischer Kunstdünger (SMR + Haber-Bosch): Negativ.** Pro Tonne Ammoniak entstehen bei der konventionellen fossilen Herstellung rund **1,8 bis 2,2 Tonnen CO_2**.

- **Methan-Pyrolyse + Terra Preta: Netto-Negativ (Carbon Dioxide Removal - CDR).** Bei Verwendung von fossilem Erdgas ist der Prozess CO_2-neutral, da der Kohlenstoff fest gebunden wird. Setzt man hingegen **Biomethan** (aus Biogas) ein, wandelt sich das Verfahren in eine **PyCCS-Technologie** (Pyrogenic Carbon Capture and Storage): Das zuvor von Pflanzen aus der Atmosphäre entnommene CO_2 wird dauerhaft als elementarer Kohlenstoff im Boden fixiert. Pro Tonne erzeugtem Kohlenstoff werden netto ca. **3,67 Tonnen CO_2** dauerhaft der Atmosphäre entzogen. [7, 8, 9, 10]

---

4. Pyrolyse/Terra-Preta vs. klassisches CCS: Die bessere Alternative?

Ja, mittelfristig und dezentral ist dieses Verfahren in vielerlei Hinsicht den klassischen CCS-Verfahren überlegen. CCS (Carbon Capture and Storage) kämpft mit immensen geologischen, energetischen und gesellschaftlichen Hürden.

Die Nutzung von Methan-Pyrolyse zur Terra-Preta-Erzeugung bietet fundamentale Systemvorteile:

- **Sicherheit statt Risiko**: Klassisches CCS presst gasförmiges oder superkritisches CO_2 in tiefe Gesteinsschichten (z. B. leere Gasfelder unter der Nordsee). Es besteht immer das Risiko von Leckagen. Terra Preta speichert den Kohlenstoff als **reinen Feststoff thermodynamisch stabil** über Jahrhunderte direkt an der Oberfläche (im Oberboden). [4, 11]
- **Doppelter Nutzwert (Circular Economy)**: CCS ist ein reines Entsorgungsverfahren, das Geld und Energie kostet, ohne ein direktes physisches Produkt zu erzeugen. Die Pyrolyse-Terra-Preta-Kette hingegen erzeugt **zwei extrem wertvolle Güter**: sauberen Wasserstoff für die Industrie und ein hochfruchtbares Bodensubstrat, das Ernteerträge steigert und Böden gegen Dürren resistent macht. [1, 7, 9, 11, 12]
- **Nutzung von Sowieso-Biogas**: Da anthropogenes Methan (aus Deponien, Gülle und unvermeidbarer Biomasse) ohnehin abgefangen werden muss, wandelt diese Methode ein hochpotentes Treibhausgas direkt in eine dauerhafte CO_2-Senke um, statt es wirkungslos zu fackeln. [3, 10]
-

Möchten Sie für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nähere Details zu den **Kosten pro Tonne fixiertem CO_2** im Vergleich zu geologischem CCS erfahren, oder interessiert Sie die **Skalierbarkeit der regionalen Biogas-Pyrolyse**?

[1] https://terra-preta.de
[2] https://link.springer.com
[3] https://www.allpowerlabs.com
[4] https://www.css.cornell.edu
[5] https://minesparis-psl.hal.science
[6] https://ureaknowhow.com
[7] https://pubs.rsc.org
[8] https://pubs.acs.org
[9] https://www.researchgate.net
[10] https://www.sciencedirect.com
[11] https://nachhaltigwirtschaften.at
[12] https://tgoag.com

Wieviele Methan-Pyrolyse-Anlagen, ähnlich der von BASF betriebenen, müssten gebaut werden, um den Bedarf an "Ersatzdünger" in der EU zu befriedigen? Welcher "Dünger" ist nachhaltiger und welcher verursacht Folgeschäden an Gewässern und Luft?

Um den gesamten Bedarf an mineralischem Stickstoffdünger in der Europäischen Union (EU) rein über die Kette der Methan-Pyrolyse und Terra Preta zu decken, ist eine massive industrielle Infrastruktur erforderlich. Die Modellrechnung zeigt die notwendige Dimension, gefolgt von einer ökologischen Bewertung der beiden Düngesysteme.

1. Anzahl der benötigten Methan-Pyrolyse-Anlagen

Die von BASF (in Kooperation mit ExxonMobil) betriebene große Demonstrationsanlage in Ludwigshafen besitzt eine Jahreskapazität von **6.000 Tonnen festem Kohlenstoff** und 2.000 Tonnen Wasserstoff. [1]

Die Bedarfsrechnung für die EU

1. **Stickstoffbedarf der EU:** Die EU verbraucht jährlich rund **10 bis 11 Millionen Tonnen** reinen Stickstoff (N) in Form von Mineraldünger.
2. **Kopplung an Kohlenstoff (C:N-Verhältnis):** Um Terra Preta herzustellen, die den Stickstoff stabil pflanzenverfügbar speichert und den Mineraldünger ersetzt, wird ein C:N-Verhältnis von etwa **10:1** benötigt. Das bedeutet: Für jede Tonne Stickstoff müssen 10 Tonnen Pyrolyse-Kohlenstoff als Trägermatrix bereitgestellt werden.
3. **Kohlenstoffbedarf:** 10.500.000t (N) * 10 = 105.000.000 Tonnen Kohlenstoff pro Jahr.

Anzahl der BASF-Demonstrationsanlagen

Teilt man den benötigten Kohlenstoff durch die Kapazität einer BASF-Anlage (6.000t/a), ergibt sich: [1]

105.000.000t / (6.000t/Anlage) = 17.500 Anlagen.

Hinweis zur Skalierung: Dies gilt für Anlagen der aktuellen *Demonstrationsgröße*. Würde man das Verfahren auf kommerzielle Großanlagen hochskalieren (z. B. mit einer 20-fach höheren Kapazität von 120.000t Kohlenstoff pro Jahr), reduzierte sich die Zahl auf rund **875 Großanlagen** für die gesamte EU. [1]

2. Nachhaltigkeit und Folgenschäden: Ein Systemvergleich

Die beiden Düngungsformen unterscheiden sich fundamental in ihrer Interaktion mit der Biosphäre, den Gewässern und der Atmosphäre. [2]

Klassischer Mineraldünger (Kunstdünger)

Konventionelle Stickstoffdünger (wie Ammoniumnitrat oder Harnstoff) basieren auf fossilem Erdgas und verursachen entlang der gesamten Kette schwere ökologische Folgenschäden: [3]

- **Schäden an Gewässern (Eutrophierung):** Mineraldünger ist leicht wasserlöslich. Bei Starkregen wird ein erheblicher Teil ins Grundwasser und

in Flüsse ausgewaschen. Die Folge ist eine massive **Nitratbelastung des Grundwassers** sowie Algenblüten in Meeren (z. B. Todeszonen in der Ostsee). [4, 5, 6]

- **Schäden an der Luft (Klimagase & Feinstaub):** Auf den Feldern wandeln Bodenbakterien überschüssigen Dünger in **Lachgas (N_2O)** um. Lachgas ist ein extremes Treibhausgas – etwa **300-mal klimaschädlicher als CO_2**. Zudem entweicht Ammoniak (NH_3), das in der Atmosphäre zur Bildung von sekundärem Feinstaub beiträgt und nahegelegene Ökosysteme überdüngt (Versauerung von Wäldern). [7, 8, 9, 10, 11]

Pyrolyse-basiertes Terra-Preta-System

Dieses System gilt ökologisch als hochentwickelte Kreislaufwirtschaft und schneidet in allen Nachhaltigkeitsmetriken signifikant besser aus:

- **Schutz der Gewässer:** Terra Preta wirkt im Boden wie ein **biologischer Schwamm**. Aufgrund der extrem hohen Kationenaustauschkapazität (KAK) bindet die oxidierte Kohleoberfläche Ammonium- und Nitrat-Ionen physikalisch-chemisch fest an sich. Nährstoffe werden dadurch kaum noch ausgewaschen, das Grundwasser bleibt sauber. [12, 13]
- **Schutz der Luft:** Da die Nährstoffe organisch in der Humusmatrix stabilisiert sind, wird die unkontrollierte Ausgasung von Lachgas drastisch reduziert (Studien zeigen Minderungen der N_2O-Emissionen um bis zu 50–80 %). [14]
- **Bodenaufbau:** Terra Preta führt im Gegensatz zu reinem Kunstdünger zu einem permanenten Aufbau von Dauerhumus, erhöht die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens (Resistenz gegen Dürrephasen) und fördert das Bodenleben (Regenwürmer, Mykorrhiza-Pilze). [7, 12, 15, 16]
-

---

3. Fazit: Besser als teures, geologisches CCS?

Ja, das Verfahren ist der rein geologischen Verpressung von CO_2 (CCS) langfristig überlegen.

Während CCS ein reines "End-of-Pipe"-Entsorgungsverfahren ohne wirtschaftlichen Zusatznutzen darstellt, löst die Verwertung von Pyrolyse-Kohlenstoff in Terra Preta drei Krisen gleichzeitig:

1. Sie **entzieht der Atmosphäre dauerhaft Kohlenstoff** (Kohlenstoffsenke / CDR).
2. Sie liefert als Nebenprodukt **"türkisen" Wasserstoff** für die Dekarbonisierung der Industrie.
3. Sie heilt die durch jahrzehntelange Überdüngung ausgelaugten Agrarböden und schützt das Trinkwasser. [1, 4, 5, 15, 17, 18]

Wenn Sie tiefer in die Materie einsteigen möchten, lassen Sie mich wissen:

- Sollen wir berechnen, wie viel **Biomethan/Erdgas** die oben genannte Anzahl an Pyrolyse-Anlagen jährlich verarbeiten müsste?
- Möchten Sie mehr über die **gesetzlichen Hürden** (wie die EU-Düngeverordnung) bei der Zulassung von Pyrolyse-Kohlenstoff auf Feldern erfahren? [1, 2, 19, 20]

[1] https://www.chemieindustrie-online.de
[2] https://www.researchgate.net
[3] https://www.agrarheute.com
[4] https://de.statista.com
[5] https://www.academia.edu
[6] https://www.oekom.de
[7] https://elmoukrie.com
[8] https://www.transgen.de
[9] https://www.derpragmaticus.com
[10] https://fryd.app
[11] https://www.mpg.de
[12] https://iris.enea.it
[13] https://www.blumen-schwarz.de
[14] https://samen.de
[15] https://www.researchgate.net
[16] https://www.multitanks.com
[17] https://bericht.basf.com
[18] https://www.eralberta.ca
[19] https://www.effizientduengen.de
[20] https://www.mordorintelligence.com

Wenn Du Anregungen oder Korrekturen zur dargestellten Idee hast, oder eigene Ideen zum Thema „Kohlenstoff, Wasserstoff, Landwirtschaft“ beitragen möchtest, schreib bitte eine eMail an info@solarharz.de?subject=Idee

Mich interessieren noch die gegenüberzustellenden Kosten

Die wirtschaftliche Betrachtung zeigt ein paradoxes Bild: Die **Kombination aus Methan-Pyrolyse und Terra Preta** ist in der reinen Herstellung teurer als Kunstdünger, hebelt sich jedoch durch den Verkauf des Koppelprodukts **Wasserstoff** und durch die Einsparung von Umweltfolgekosten in eine massive Profitabilität.

Eine detaillierte Gegenüberstellung der Kostenstrukturen verdeutlicht die wirtschaftliche Dynamik des Verfahrens:

🏭 1. Reine Produktionskosten im Vergleich

Die Produktionskosten basieren auf marktüblichen industriellen Durchschnittswerten. [1, 2]

- **Klassischer Kunstdünger (Haber-Bosch): 250 bis 500€** pro Tonne (stark gekoppelt an den fossilen Erdgaspreis).
- **Terra Preta aus Pyrolyse-Kohlenstoff: 600 bis 950€** pro Tonne Mischsubstrat.
    - *Zusammensetzung:* Die Kosten für den Kohlenstoff aus der Pyrolyse betragen rund **150 bis 300€** anteilig pro Tonne Substrat (Gesamtkosten für reinen Pyrolyse-Kohlenstoff liegen bei ca. 1.000 bis 1.500€/t). Hinzu kommen ca. **450 bis 650€** für Biomasse/Stickstoff-Zuschläge, mechanische Granulierung, Logistik und die mehrwöchige Fermentation. [1, 3]
-

⚖️ 2. Der wirtschaftliche Hebel (Das Koppelprodukt Wasserstoff)

Betrachtet man das Terra-Preta-System isoliert, ist es für Landwirte im Vergleich zu billigem Kunstdünger zunächst nicht wettbewerbsfähig. Die Ökonomie verändert sich jedoch fundamental, wenn das **Hauptprodukt der Pyrolyse** einbezogen wird: [4]

Aus 1kg Methan entstehen im Prozess **0,75kg fester Kohlenstoff** und **0,25kg Wasserstoff**. [5, 6]

- **Wasserstoff-Erlöse:** Die Produktionskosten für "türkisen" Wasserstoff liegen bei ca. **1,50 bis 3,00€/kg**. Auf dem Markt für dekarbonisierte Industrieanwendungen (Stahl, Chemie) erzielt dieser Wasserstoff hohe Preise. [7, 8]
- **Quersubventionierung:** Da der Wasserstoff die Anlageninvestitionen (CAPEX) und Betriebskosten (OPEX) der Pyrolyse zu großen Teilen deckt, kann der Kohlenstoff extrem günstig oder sogar zu **Nullkosten** an die Terra-Preta-Aufbereitung abgegeben werden. Dies senkt den Preis der Terra Preta für die Landwirtschaft in Richtung **300 bis 400€/t**. [1, 9]

🌍 3. Gesamtwirtschaftliche Kosten & vermiedene Schäden

Bezieht man die volkswirtschaftlichen und ökologischen Folgekosten (Externalitäten) ein, ist das Terra-Preta-Verfahren die deutlich günstigere Lösung:

Kosten klassischer Kunstdünger

- **Direkte Folgekosten:** Die Allgemeinheit trägt über die Wassergebühren die immensen Kosten für die **Nitrat-Reinigung im Grundwasser** (Trinkwasseraufbereitung).
- **CO_2-Bepreisung:** Die Produktion verursacht ca. 2t CO_2 pro Tonne Dünger. Bei einem kalkulatorischen CO_2-Preis von 100€/t entstehen versteckte Zusatzkosten von **200€** pro Tonne Dünger.

Ersparnis durch Terra Preta

- **Substrat-Wertsteigerung:** Im Gegensatz zu Kunstdünger, der nach einer Saison verbraucht ist, bleibt Terra Preta dauerhaft im Boden. Sie verbessert die **Wasserspeicherfähigkeit**, wodurch Landwirte erhebliche Kosten bei der künstlichen Bewässerung in Dürreperioden einsparen.
- **Zertifikate-Erlöse (Carbon Removal):** Jede Tonne in den Boden eingebrachter Pyrolyse-Kohlenstoff speichert ca. 3,67t CO_2. Über den Markt für freiwillige Kompensationszertifikate (CDR-Zertifikate, z.B. Puro.earth) erlösen Erzeuger derzeit **100 bis 200€** pro Tonne fixiertem CO_2. Das generiert eine zusätzliche Einnahme von **360 bis 730€** pro Tonne Kohlenstoff.

📌 Fazit

Die reine Produktion von Terra Preta ist betriebswirtschaftlich teurer als Kunstdünger. Durch das **Geschäftsmodell der Methan-Pyrolyse** (Verkauf von wertvollem Wasserstoff + Verkauf von CO_2-Senken-Zertifikaten) wandelt sich das System zu einer hochprofitablen Industrie, die Kunstdünger am Markt unterbieten kann.

Möchten Sie eine konkrete Beispielrechnung für die **Gewinn- und Verlustrechnung (GuV)** einer dezentralen Pyrolyseanlage an einer Biogasanlage sehen?

[1] https://eureka.patsnap.com
[2] https://pubs.acs.org
[3] https://www.oekologisches-wirtschaften.de
[4] https://flurundfurche.de
[5] https://www.hypa.at
[6] https://www.studysmarter.de
[7] https://www.sciencedirect.com
[8] https://aenert.com
[9] https://www.sciencedirect.com

Wie oft muss der Bauer mit Stickstofdünger düngen und wie oft müsste er den Vorgang mit "unserer" Terra-Preta wiederholen?

Der fundamentale Unterschied zwischen den beiden Systemen liegt in der biologischen Stabilität: Während mineralischer Kunstdünger ein **kurzlebiger Verbrauchstoff** ist, handelt es sich bei Terra Preta um eine **dauerhafte Investition in die Bodenstruktur**.

Düngefrequenz im direkten Vergleich

- **Klassischer Stickstoffdünger (Kunstdünger): 2 bis 4 Mal pro Jahr (jede Saison)**
  Da mineralischer Dünger extrem leicht wasserlöslich ist und von den Pflanzen schnell verbraucht oder ausgewaschen wird, muss der Landwirt ihn für fast jede Kulturart in mehreren Gaben pro Wachstumsperiode (z. B.

Bestockungs-, Schoss- und Spätdüngung beim Getreibe) jedes Jahr aufs Neue ausbringen. [1, 2]

- **Das Pyrolyse-Terra-Preta-System: Einmalig massiv, danach nur noch minimale Erhaltungskonzentrationen**
  Die Kohlenstoffmatrix der Terra Preta baut sich im Boden praktisch **nicht mehr ab** (Halbwertszeit von mehreren Jahrhunderten). Sie müssen den eigentlichen Bodenaufbauprozess daher **nur ein einziges Mal** durchführen.

Der tatsächliche Ablauf in der landwirtschaftlichen Praxis

Wenn ein Landwirt sein Feld auf das Terra-Preta-System umstellt, teilt sich das Verfahren chronologisch auf:

1. **Die Initial-Ausbringung (Jahr 1):**
   Der Boden wird einmalig mit einer großen Menge (ca. **$10 \text{ bis } 30 \text{ Tonnen}$** fertiger Terra Preta pro Hektar) tiefgründig beimpft und eingearbeitet. Damit wird das permanente „Schwamm-System“ im Oberboden etabliert.
2. **Die Erhaltungsphase (ab Jahr 2):**
   In den Folgejahren muss **keine neue Terra Preta** mehr großflächig eingearbeitet werden. Der Bauer bringt lediglich die ohnehin auf dem Hof anfallenden organischen Nährstoffe (wie Gülle, Mist oder Kompost) aus. Der bereits im Boden vorhandene Pyrolyse-Kohlenstoff saugt diese Nährstoffe sofort auf, bindet sie reversibel und reaktiviert die Terra-Preta-Wirkung von selbst. [3]
3. **Ergebnis**: Nach der einmaligen Initialzündung ist das Feld über Generationen hinweg vor Nährstoffauswaschung geschützt und benötigt keinen synthetischen Dünger mehr.

Wenn Sie möchten, können wir als Nächstes betrachten, wie viele **Jahre Amortisationszeit** ein Landwirt einplanen muss, bis sich die hohen Initialkosten der Terra-Preta-Ausbringung durch die eingesparten jährlichen Kunstdünger-Kosten bezahlt machen.

[1] https://www.mein-schoener-garten.de
[2] https://samen.de
[3] https://www.multikraft.com

Genau das wäre meine nächste Frage gewesen. Haben wir die Nachhaltigkeit bei der "Terra-Preta-Düngung" bereits in die Wirtschaftlichkeitsrechnung für den Bauern einbezogen? Sollte das Landwirtschaftsministerium hier nicht Anschubmittel, bzw. zinslose Kredite bereitstellen? Das wäre doch vermutlich für die Stabilisierung der Lebensmittelpreise förderlich?

In der vorherigen vereinfachten Betrachtung waren die Nachhaltigkeitseffekte noch nicht vollständig eingepreist, sondern wurden als „Zusatzeffekt“ behandelt. Rechnet man diese Öko-Systemdienstleistungen jedoch systematisch ein, verschiebt sich das ökonomische Bild der Terra Preta drastisch zum Positiven. [1]

📈 1. Einpreisung der Nachhaltigkeit in die Wirtschaftlichkeitsrechnung

Wenn ein Landwirt Terra Preta einsetzt, amortisiert sich die hohe Anfangsinvestition (ca. **10.000 bis 15.000€** pro Hektar für die einmalige Aufbringung von 20t) über mehrere Hebel. [1]

Betriebswirtschaftliche Einsparungen (pro Jahr und Hektar)

- **Wegfall der Kunstdünger-Kosten:** Ca. **200 bis 400€** Einsparung jährlich, da der Nährstoffkreislauf geschlossen bleibt.
- **Wasser-Resistenz in Dürreperioden:** Die erhöhte Speicherfähigkeit der Terra Preta sichert den Ertrag bei Trockenheit. Ein vermiedener Ernteausfall (z.B. 20% bei Weizen) spart kalkulatorisch rund **300 bis 500€** pro Hektar und Dürrejahr.
- **Einnahmen durch Carbon-Farming-Zertifikate:** Über die EU-Verordnung für Carbon Removal and Carbon Farming (CRCF-VO) kann der dauerhaft im Boden gebundene Pyrolyse-Kohlenstoff zertifiziert werden. Bei 20t eingebrachter Terra Preta (ca. 5t reiner Kohlenstoff) entspricht das einer einmaligen Senkenleistung von knapp 18t CO_2. Bei aktuellen Marktpreisen für Senkenzertifikate bringt dies dem Bauern einmalig **1.800 bis 3.600€** direkt zu Beginn. [2]

Amortisationsdauer: Ohne Förderung trägt der Landwirt ein hohes finanzielles Risiko, da sich die Investition erst nach **10 bis 15 Jahren** rein über die Erträge und Düngereinsparungen rechnet.

🏛️ 2. Rolle des Landwirtschaftsministeriums: Staatliche Anschubmittel

Ihre Forderung nach staatlichen Anschubmitteln ist gesundheitspolitisch und ökonomisch absolut folgerichtig. Tatsächlich bewegt sich die Politik genau in diese Richtung, wenn auch noch stark fokussiert auf Forschung und Pilotprojekte:

- **Aktive Programme:** Das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) hat das „Bundesprogramm Humus“ ins Leben gerufen, welches über den Klima- und Transformationsfonds finanziert wird. Zudem fördert das BMEL gezielt die Entwicklung standardisierter Zertifizierungssysteme für Carbon Farming, um Landwirten rechtssichere Zusatzeinkommen zu ermöglichen. [2, 3, 4]
- **Das Problem der "Capital Expenditure" (CAPEX):** Bislang fehlen jedoch flächendeckende, zinslose Großkredite (z.B. über die Rentenbank oder KfW), die einem Landwirt die extrem hohen Vorabkosten für die Terra-Preta-Spreitung abnehmen. Da der Landwirt die Investition im ersten Jahr tätigt, der Nutzen sich aber über 30 Jahre verteilt, ist eine staatliche **Vorfinanzierung oder eine Prämie pro Tonne dauerhaft ausgebrachtem Kohlenstoff** der notwendige politische Hebel. [5]

🌾 3. Stabilisierung der Lebensmittelpreise

Ein staatlich gestütztes Terra-Preta-System wäre mittelfristig ein mächtiges Werkzeug zur **Stabilisierung der Lebensmittelpreise**:

1. **Entkopplung von fossilen Märkten:** Klassischer Kunstdünger hängt am Tropf des Erdgaspreises. Die Energiekrise hat gezeigt, wie rasant Lebensmittelpreise steigen, wenn Erdgas und damit Dünger unbezahlbar werden. Terra Preta macht die Landwirtschaft unabhängig von diesen fossilen Preisschocks.
2. **Ertragssicherheit bei Extremwetter:** Durch den Klimawandel häufen sich Dürresommer und Starkregenereignisse. Da Terra Preta sowohl Wasser speichern als auch den Boden vor Erosion schützen kann, glättet sie die wetterbedingten Ernteschwankungen. Stabilere Ernten bedeuten stabilere Preise im Supermarkt. [6, 7, 8]

📌 Fazit

Das System ist betriebswirtschaftlich nur dann sofort für den Bauern attraktiv, wenn die **CO_2-Zertifikate (Carbon Farming)** unbürokratisch ausgezahlt werden. Ein staatliches Kreditprogramm für die Initialkosten würde den Übergang massiv beschleunigen und gleichzeitig die volkswirtschaftlichen Kosten für die Trinkwasserreinigung (Nitrat) drastisch senken. [2, 9]

Wäre es für Sie von Interesse, ein fiktives **Förder- und Finanzierungsmodell** durchzurechnen, das zeigt, ab welcher staatlichen Subventionierung pro Hektar der Umstieg für einen durchschnittlichen Hof sofort rentabel wird? [7]

[1] https://www.mdpi.com
[2] https://foerderung.fnr.de
[3] https://humus.fnr.de
[4] https://wald.fnr.de
[5] https://life-carbon-farming.eu
[6] https://www.zeit.de
[7] https://www.researchgate.net
[8] https://naturschutz.ch
[9] https://www.youtube.com

Wenn Du Anregungen oder Korrekturen zur dargestellten Idee hast, oder eigene Ideen zum Thema „Kohlenstoff, Wasserstoff, Landwirtschaft“ beitragen möchtest, schreib bitte eine eMail an info@solarharz.de?subject=Idee