

von Nils Matzner und
Danny Otto

Carbon Cascadia

Das Kartenspiel

CCG
Carbon Cascadia Games

Ihre Aufgabe

Der Klimawandel ist bereits in vollem Gange, und die CO₂-Emissionen steigen weiter an. Internationale Klimaforscher:innen sehen neben einer raschen Reduzierung der Emissionen auch einen dringenden Bedarf an CO₂-Entnahme (CDR), um das Schlimmste abzuwenden. Akteure aus Forstwirtschaft, Landwirtschaft, Regierung, Zivilgesellschaft, Bioenergieerzeugung, Pflanzenkohleproduktion, CO₂-Speicherung und viele andere müssen zusammenarbeiten, um möglichst effektive, kosteneffiziente, dauerhafte und nachhaltige Verfahren zur Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre zu etablieren. Nur mit gemeinsamen Anstrengungen können sie biomassabasierte CDR-Kaskaden erreichen, d. h. mehrere Biomasseströme und CO₂-Entnahmemethoden miteinander verknüpfen. Die Akteure suchen gemeinsam nach den besten Kaskaden.



Waldbauliche Maßnahmen

Waldbauliche Maßnahmen

Hierbei handelt es sich um den Wald betreffende Maßnahmen mit Einfluss auf dessen CO₂-Speicherpotentiale. Es kann sich sowohl um Stilllegungen von Waldflächen, Waldfächenerweiterung oder Aufforstungsmaßnahmen handeln.

Waldbauliche Maßnahmen

Aufforstung mit Buche

Die Aufforstungen von buchendominierten, anpassungs- und widerstandsfähigen Mischwäldern als Kohlenstoffsenken auf zuvor nicht forstwirtschaftlich genutzten Flächen (z.B. landwirtschaftliche Nutzflächen) erfolgt durch das Pflanzen von Setzlingen. Dadurch kann langfristig Kohlenstoff gebunden werden.



Aufforstung Buche

Liefert Biomasse	Aufforstung Buche	Speichert CO ₂
CO ₂ -Entnahmepotential (pro ha und Jahr)	≈ 3,8 t	
CO ₂ -Entnahmekosten (pro t CO ₂)	60-70 €	
Speicherpermanenz	<100 Jahre	

Besondere Eigenschaften:
Vollständiges Entnahmepotential erst ab 30 Jahren



Aufforstung Douglasie

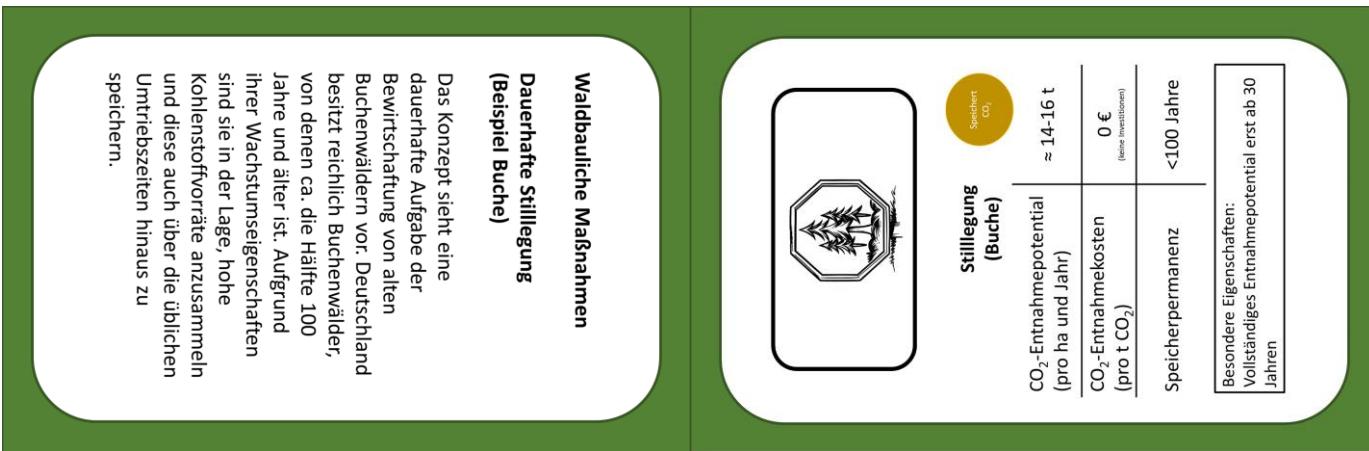
Liefert Biomasse	Aufforstung Douglasie	Speichert CO ₂
CO ₂ -Entnahmepotential (pro ha und Jahr)	≈ 9,6 t	
CO ₂ -Entnahmekosten (pro t CO ₂)	8-9 €	
Speicherpermanenz	<100 Jahre	

Besondere Eigenschaften:
Vollständiges Entnahmepotential erst ab 20 Jahren

Waldbauliche Maßnahmen

Aufforstung mit Douglasie

Die Aufforstungen von douglasiendominierten, anpassungs- und widerstandsfähigen Mischwäldern als Kohlenstoffsenken auf zuvor nicht forstwirtschaftlich genutzten Flächen (z.B. landwirtschaftliche Nutzflächen) erfolgt durch das Pflanzen von Setzlingen. Dadurch kann langfristig Kohlenstoff gebunden werden.



Waldbauliche Maßnahmen

Waldflächenerweiterung (Sukzession)

Das Konzept zielt auf das Zulassen einer Landnutzungsänderung auf bisher unbewaldeten Flächen in Deutschland ab. Das bewusste Zulassen und Steuern der natürlichen Sukzession in Form von überwiegend natürlicher Ansaat ermöglicht eine langfristige CO₂-Anreicherung in Bäumen und Böden.



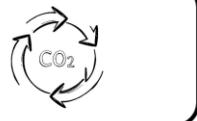
Waldflächen-
erweiterung

CO ₂ -Emissionspotential (pro ha und Jahr)	Kontext-abhängig
CO ₂ -Entnahmepotential (pro t CO ₂)	Kontext-abhängig
Speicherpermanenz >100 Jahre	abhängig

CO₂-Nutzung

CO₂-Nutzung

Das abgefangene CO₂ kann in verschiedenen Anwendungen verwendet werden, wie z. B. in der Herstellung von Treibstoffen, Chemikalien, Baustoffen oder sogar in der Landwirtschaft. CCS trägt dazu bei, die CO₂-Emissionen zu reduzieren und gleichzeitig die Ressourcen Nutzung zu optimieren, indem es Kohlenstoff als Rohstoff nutzt, anstatt ihn als Abfallprodukt zu betrachten. Anders als bei der geologischen Speicherung ist die Permanenz der Speicherung nur kontextspezifisch zu bestimmen.



CO ₂ -Potential (t pro Jahr)	Kontext-abhängig
Kosten (pro t CO ₂)	Kontext-abhängig
Speicherpermanenz	Kontext-abhängig

Besondere Eigenschaften:
Benötigt zusätzliche Infrastruktur für Transport von CO₂



CO₂-Speicherung (geologisch)

CO ₂ -Speicherkapazität Deutschland	≈ 2,3-12,8 Gt
CO ₂ -Speicherkapazität Europa	≈ 200 Gt
CCS-Kosten (pro t CO ₂)	20-70 €

Speicherpermanenz	>1000
Besondere Eigenschaften: Benötigt zusätzliche Infrastruktur für Transport von CO ₂	

Speicherung von CO₂ in geologischen Formationen

Abgeschiedenes CO₂ kann in verschiedenen geologischen Formationen (u.a. saline Aquifere, ehemalige Erdgasfelder) in Tiefen von mehr als 800 m permanent gespeichert werden. Das zu speichernde CO₂ kann aus verschiedenen Quellen stammen. Die Angaben zu Kosten fokussieren auf CO₂ aus biomasse-nutzenden Energieerzeugungsprozessen (u.a. Biogasproduktion, Biomethanproduktion) und umfassen Abscheidung, Transport und Speicherung.



Landwirtschaft und Böden

Landwirtschaft und Böden

Hierbei handelt es sich um Maßnahmen in der Landwirtschaft, die Einfluss auf die CO₂-Speicherpotentiale des Bodens haben. Hierzu zählen u.a. Direktsaat, Umwandlung in Dauergrünland, ganzjährige Bodenbedeckung, die Nutzung organischer Düngemittel oder Agroforstsysteme.

Landwirtschaft und Böden

Umwandlung in Dauergrünland

Die Umwandlung von Ackerflächen in Dauergrünland erhöht das Potenzial der Kohlenstoffspeicherung im Boden durch die ganzjährige pflanzliche Bodenbedeckung und der stark reduzierten Bodenbearbeitung. Die daraus resultierende Bindung von Kohlenstoff im Boden durch Dauergrünland hat dadurch eine CO₂-Senkenwirkung.



Liefert Biomasse	Dauergrünland	Speichert CO ₂
CO ₂ -Entnahmepotential (pro ha und Jahr)	≈ 3,1 t	
CO ₂ -Entnahmekosten (pro t CO ₂)	77-170 €	
Speicherpermanenz	Unsicher	

Landwirtschaft und Böden

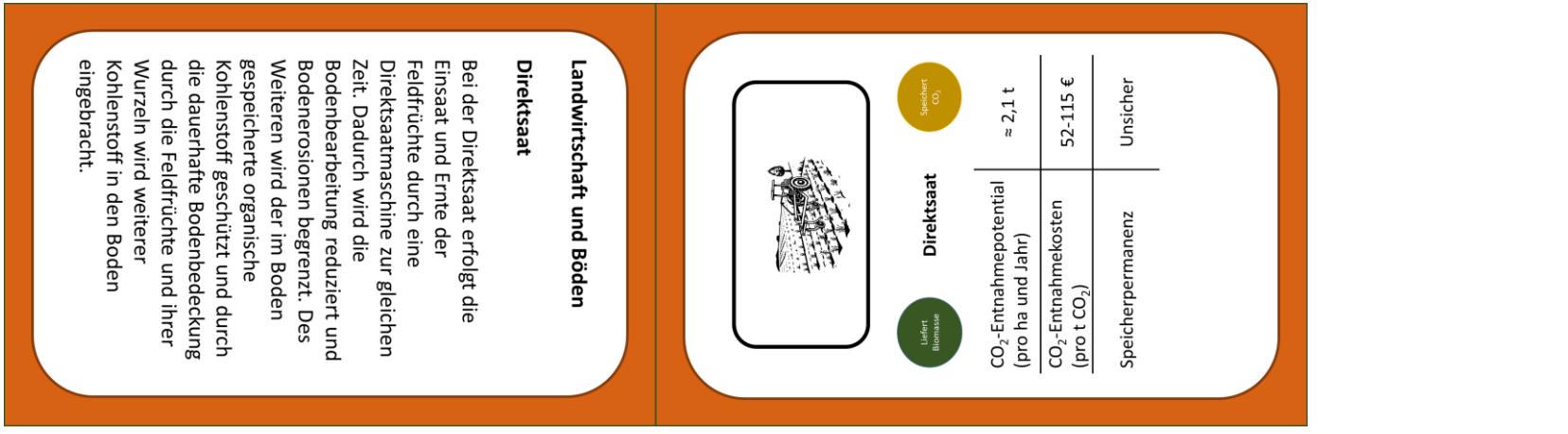
Agroforstwirtschaft

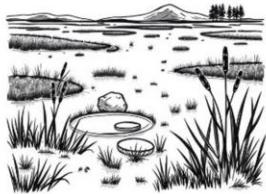
Agroforstsysteme sind Landnutzungssysteme, bei denen Gehölze (Bäume, Hecken, Stäucher) mit landwirtschaftlichen Flächen kombiniert werden. Durch diese Kombination wird eine höhere Kohlenstoffanreicherung im Boden gewährleistet. Die Fläche unter den Bäumen kann entweder als Garten- und Ackerbau oder als Weide genutzt werden.



Liefert Biomasse	Agroforstwirtschaft	Speichert CO ₂
CO ₂ -Entnahmepotential (pro ha und Jahr)	≈ 5-20,8 t	
CO ₂ -Entnahmekosten (pro t CO ₂)	125-1144 €	
Speicherpermanenz	<100 Jahre	

Besondere Eigenschaften:
Langfristigere Kohlenstoffbindung durch Gehölze gewährleistet





Wiedervernässung

Wiedervernässung von Mooren

Unter der Wiedervernässung von Mooren versteht man die Wiederherstellung eines stabilen Grundwasserspiegels an der Geländeoberfläche. Die Wiedervernässung entwässerter Moore kann den Netto-Kohlenstoff-Verlust sofort reduzieren oder stoppen und kann außerdem zu einer neuen CO₂-Entnahme in der Streuschicht und im Torf führen. Solange das Moor nass bleibt, wird der Kohlenstoff permanent festgelegt.



Paludikultur

Liefert Biomasse	Speichert CO ₂
CO ₂ -Entnahmepotential (pro ha und Jahr)	≈ 4 t

CO ₂ -Entnahmekosten (pro t CO ₂)	6000-34000 € (Bau, Investitionskosten)
Speicherpermanenz	so lange Moor nass bleibt

Besondere Eigenschaften:	Hohes THG-Vermeidungspotential (27-36t CO ₂ pro ha und Jahr)
--------------------------	---

Wiedervernässung von Mooren

Paludikultur

Paludikultur ist eine produktive Landnutzung auf nassen und wiedervernässten Mooren. Paludikultur umfasst jede Art der Biomassenutzung, von der Ernte spontaner Vegetation auf naturnahen Standorten bis hin zu neu angelegten Kulturen auf wiedervernässten Standorten, unter Bedingungen, die den Torfkörper erhalten oder sogar eine neue Torfakkumulation begünstigen. Laufende Kosten: 1200-1700€ pro Hektar und Jahr



Stilllegung der Moorfläche

CO ₂ -Entnahmepotential (pro ha und Jahr)	≈ 1-8 t
CO ₂ -Entnahmekosten (pro Hektar und Jahr)	1000-17000 € (Bau, Investitionskosten)

Speicherpermanenz	so lange Moor nass bleibt
-------------------	---------------------------

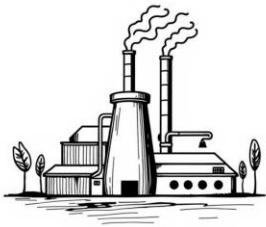
Besondere Eigenschaften:	Hohes THG-Vermeidungspotential (27-36t CO ₂ pro ha und Jahr)
--------------------------	---

Wiedervernässung von Mooren

Stilllegung wiedervernässter Moorflächen

Wiedervernässte Moore werden nicht weitergenutzt. Der Wasserstand wird stabil gehalten, damit das Moor dauerhaft nass bleibt, um eine Permanenz der Speicherung zu gewährleisten.

Kostenreduktion auf 100-1600€ pro ha und Jahr für Pflege, Unterhaltung und Wartung.



Bioenergie

Bioenergie

Bioenergie wird aus organischen Materialien wie Pflanzen oder Abfällen gewonnen. Bei der Biogasproduktion wird organisches Material vergoren, um Biogas für die Energiegewinnung zu erzeugen. Biomethan ist aufbereitetes Biogas, das als Erdgasersatz dient. Die Biomassevergasung wandelt Biomasse in ein brennbares Gas um. Ein wichtiges Verfahren zur CO₂-Entnahme ist BECCS, bei dem Biomasse zur Energiegewinnung genutzt und das freigesetzte CO₂ langfristig gespeichert wird.



Biogasproduktion

Nutzt Biomasse	
CO ₂ -Potential (t pro Jahr)	≈ 3200 t (in Modellanlage)
Kosten (pro t CO ₂)	139-313 €
Speicher-permanenz	Abhängig von CO ₂ -Weiternutzung

Besondere Eigenschaften:
Benötigt zusätzliche Infrastruktur für Transport von CO₂

Bioenergie

Biogasproduktion

In Biogasanlagen wird Biomasse vergärt, wodurch ein Gasgemisch aus CO₂ und Methan entsteht, sogenanntes Biogas.

Beispielrechnung Modellanlage:

- Gemischtes Biomasse-Substrat aus 50 % Rindergülle, 20 % Rinderfestmist und 30 % Weizenstroh
- ca. 15 000 Tonnen Substrat pro Jahr
- 500 kWel installierte Leistung
- 8000 Vollaststunden pro Jahr
- 235 m³ Rohbiogas pro Stunde mit 47 % CO₂



Biomasse-vergasung

Nutzt Biomasse	
CO ₂ -Potential (t pro Jahr)	≈ 60.000 t (in Modellanlage)
Kosten (pro t CO ₂)	27-365 €

Besondere Eigenschaften:
Benötigt zusätzliche Infrastruktur für Transport von CO₂

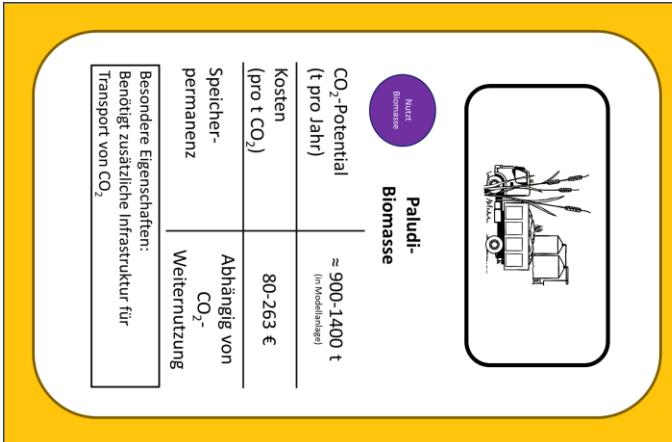
Bioenergie

Biomasse-Vergasung

In der Holzvergasung wird Lignozellulose-Biomasse bei hohen Temperaturen in Synthesegas umgewandelt, das im Anschluss über eine Fischer-Tropsch-Synthese zu Biokraftstoffen umgesetzt wird.

Beispielrechnung Modellanlage:

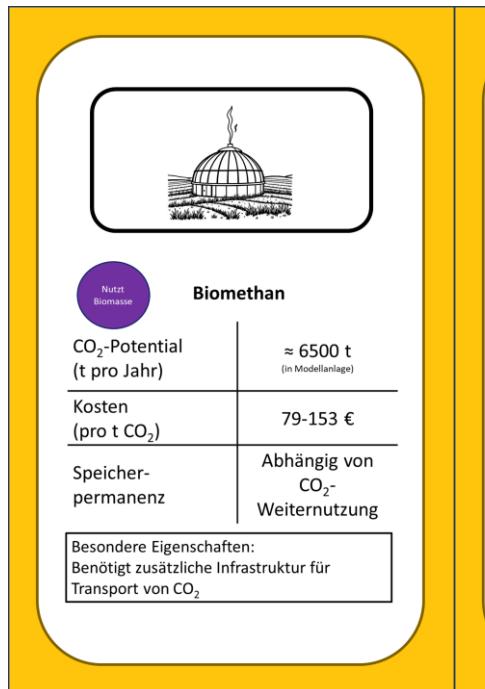
- 100 MWth installierte Leistung
- Ca. 160 000 Tonnen pro Jahr Holzhackschnitzel (Buchenholz)
- Ca. 3 000 Vollaststunden pro Jahr
- Ca. 48 000 Tonnen Biokraftstoff pro Jahr



Bioenergie

Verbrennung von Biomasse aus Paludi-kulturen
Die Biomasse aus Paludi-kulturen, also der Bewirtschaftung nasser und wiedervernässter Moore, kann stofflich und/oder energetisch genutzt werden. Da der Heizwert von Paludi-Biomasse vergleichbar mit dem von Holz ist, eignen sich die Substanzen für den Einsatz in Heizwerken.

- Beispielrechnung Modellanlage:
- 800 kWel installierte Leistung
 - ca. 5 000 Vollaststunden pro Jahr
 - ca. 800 - 1 200 Tonnen Substrat pro Jahr (Seggen, Binsen, Schilf, etc.)



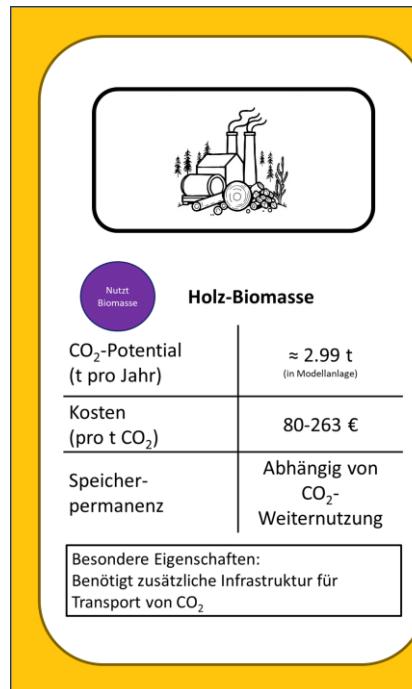
Bioenergie

Biogasaufbereitung zu Biomethan

Biogas besteht überwiegend aus Methan und CO₂. In Biogas-Aufbereitungsanlagen werden die beiden Gase getrennt. Das so gewonnene Biomethan kann ins Erdgasnetz eingespeist werden.

Beispielrechnung Modellanlage:

- 2 500 kWel installierte Leistung
- ca. 8 400 Vollaststunden pro Jahr
- ca. 1 000 m³ Rohbiogas pro Stunde (40 % CO₂)



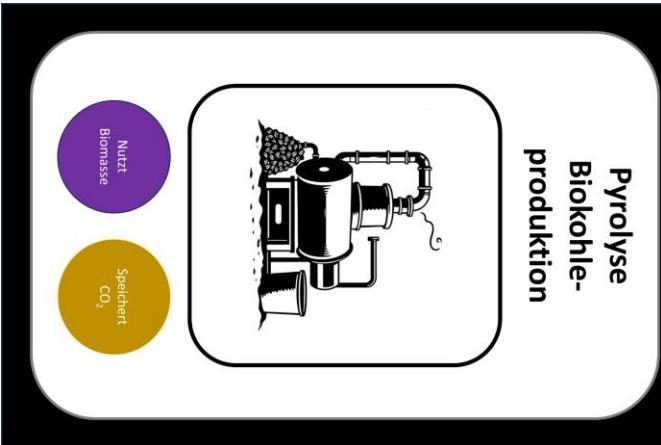
Bioenergie

Verbrennung holzartiger Biomasse

Kraftwerke zur Erzeugung von Strom und Wärme können von fossilen Energieträgern auf Holzpellets umgerüstet werden. Als Ausgangsmaterialien für die Pellets kommen Holzabfälle, andere Lignozellulose-Abfälle und Primärholz infrage.

Beispielrechnung Modellanlage

- 500 MWel installierte Leistung
- ca. 7 500 Vollaststunden pro Jahr
- ca. 2,56 Mio. Tonnen Substrat pro Jahr



Pyrolyse Biokohle- produktion

Pyrolyse Biokohleproduktion

Pyrolyse ist ein Prozess, bei dem Biomasse ohne Sauerstoff erhitzt wird. Dadurch wird das Material in Biokohle, Gase und Öle umgewandelt. Biokohle ist sehr stabil und kann CO₂ über lange Zeit speichern.



Pflanzenkohle Baustoffe

Nutzt Biomasse	Speichert CO ₂
CO ₂ -Entnahmepotential (pro ha, einmalig)	91,6 t
CO ₂ -Entnahmekosten (pro t CO ₂)	150 €
Speicherpermanenz	>100

Pflanzenkohle in Baumaterialien

Pflanzenkohle ist ein durch Pyrolyse von Pflanzenbiomasse gewonnenes Material, das in Baumaterialien verwendet werden kann (z. B. Pflanzenkohlebeton, Dachbegrünung).



Pflanzenkohle Landwirtschaft

CO ₂ -Entnahmepotential (pro ha und Jahr)	≈ 0,87 t
CO ₂ -Entnahmekosten (pro t CO ₂)	21-47€
Speicherpermanenz	>100

Besondere Eigenschaften:
Die Abbaugeschwindigkeit der Kohle im Boden beträgt 0,3% pro Jahr

Pflanzenkohle in der Landwirtschaft

Pflanzenkohle ist ein durch Pyrolyse von Pflanzenbiomasse gewonnenes Material, das auf landwirtschaftliche Böden aufgebracht wird. Die Zugabe von Biokohle/Pflanzenkohle in den Boden als sogenannter „Pyrogenet Kohlenstoff-Dünger“ sorgt zum einen für eine langfristige Kohlenstoffspeicherung durch die Kohle selbst und für eine Verbesserung der Bodenbedingungen, was zu einer höheren Kohlenstoffanreicherung im Boden durch gesteigertes Pflanzenwachstum führen kann.



Langlebige Biomasse-Materialien

Langlebige Biomasse-Materialien

Durch die Verwendung langlebiger Biomasse-Materialien im Bausektor kann CO₂ langfristig gespeichert werden. Zu den möglichen Anwendungsbereichen gehören Holzwerkstoffe (Holzskelettkonstruktionen, Massivholzkonstruktionen, Holzrahmenkonstruktionen und Hybrid-Holzkonstruktionen) und Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen.



Holzwerkstoffe

Speichert CO₂

Nutzt Biomasse	CO ₂ -Entnahmepotential (pro Wohnanlage, einmalig)
≈ 2120 t	

CO ₂ -Entnahmekosten (pro t CO ₂)	0-320 €
--	---------

Speicherpermanenz	>100
-------------------	------

Langlebige Biomasse-Materialien

Holzwerkstoffe

Das Konzept betrachtet eine Wohnanlage mit mehrgeschossigen Mehrfamilienhäusern, welche in Holzbauweise errichtet wurden. Durch den Neubau von Holzgebäuden ist von einer Kohlenstoffspeicherung von durchschnittlich 212 kg CO₂-Äquivalent/m² Brutto-Grundfläche auszugehen. Zu den Konstruktionsarten von Holzgebäuden gehören insbesondere Holzskelettkonstruktionen, Massivholzkonstruktionen, Holzrahmenkonstruktionen und Hybrid-Holzkonstruktionen.



NawaRo-Dämmstoffe

Speichert CO₂

Nutzt Biomasse	CO ₂ -Entnahmepotential (pro Einfamilienhaus)
≈ 6,5 t	

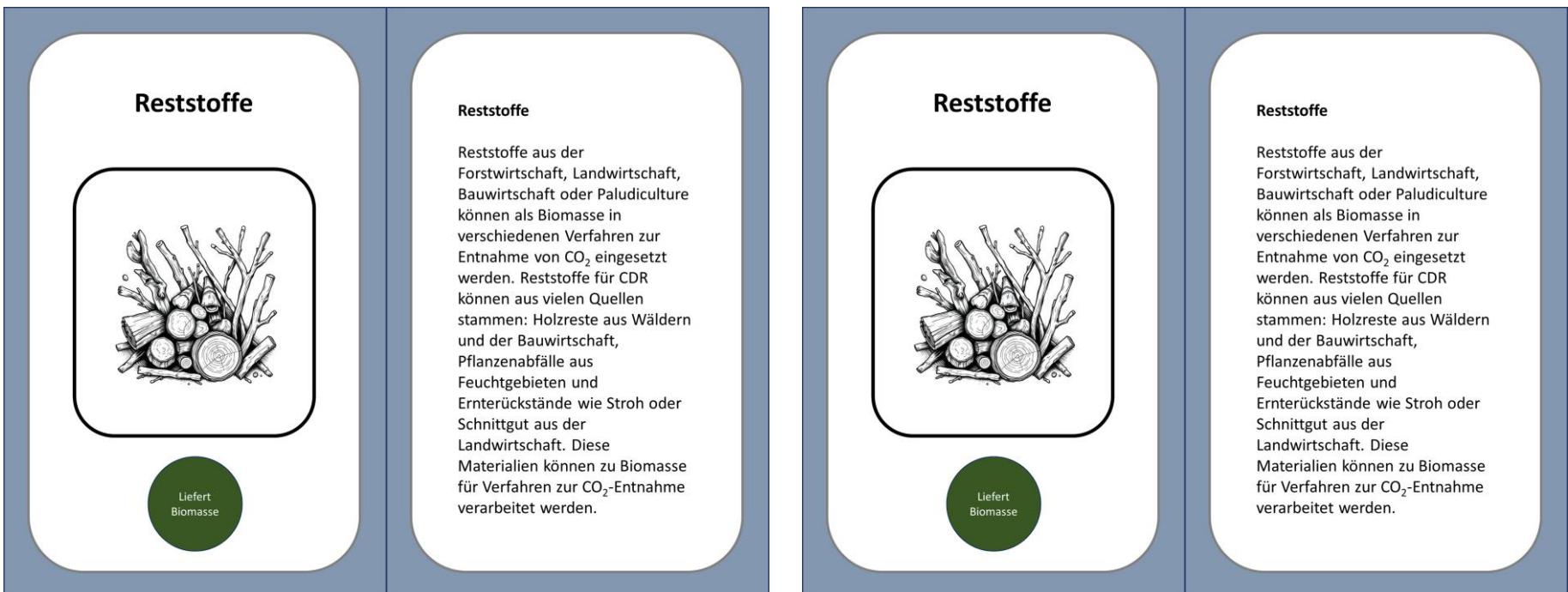
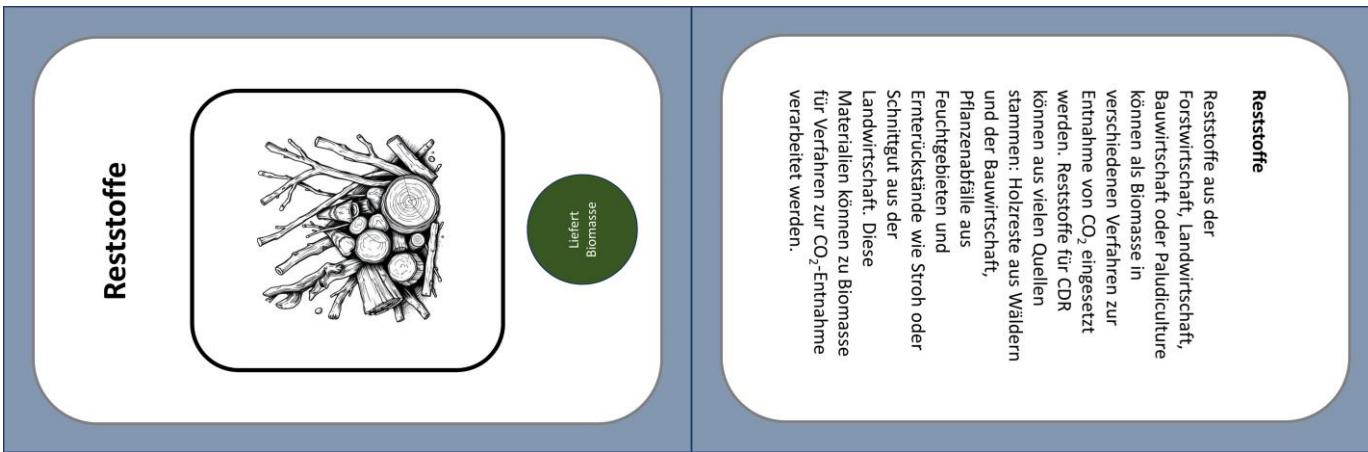
CO ₂ -Entnahmekosten (pro t CO ₂)	0-300 €
--	---------

Speicherpermanenz	>100
-------------------	------

Langlebige Biomasse-Materialien

NawaRo-Dämmstoffe

Zunehmende energetische Sanierung des Gebäudebestandes mit kohlenstoffspeichernden Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen. Durch die Sanierung von Dämmstoffen in der Wand- und Dachdämmung von bestehenden und zukünftigen Gebäuden wird der Anteil von CO₂-Senken in der thermischen Gebäudehülle erhöht. Dies umfasst alle Formen der Dämmung: Plattendämmung/Einblas-, Schütt-, und Stopfdämmung, Matten-/Ballendämmung.



Transport



Tankwagen

Transport von CO_2 per Tanklastwagen

Abgefangenes CO_2 kann verflüssigt und mit Tanklastwagen zu Speicher- oder Nutzungsstandorten transportiert werden. Dies ist besonders hilfreich, wenn keine Pipeline vorhanden ist. Umweltwirkungen entstehen vor allem durch Dieselverbrauch, der CO_2 - und Luftschadstoffemissionen verursacht, sowie durch den Energiebedarf für Druck und Kühlung des CO_2 . Kürzere Transportwege mindern diese Effekte.

Transport

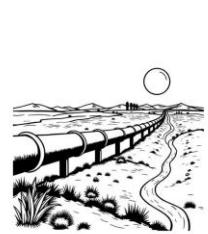


LKW

Transport von Biomasse per LKW

Biomasse kann mit üblichen LKW zu Verarbeitungsanlagen gebracht werden. Diese Methode ist flexibel und eignet sich für kurze bis mittlere Distanzen. Allerdings entstehen durch den LKW-Verkehr Emissionen, zusätzlicher Verkehr sowie Staub- und Lärmbelastungen. Die Nutzung regionaler Biomasse und optimierte Fahrtrouten können die Umweltwirkungen verringern.

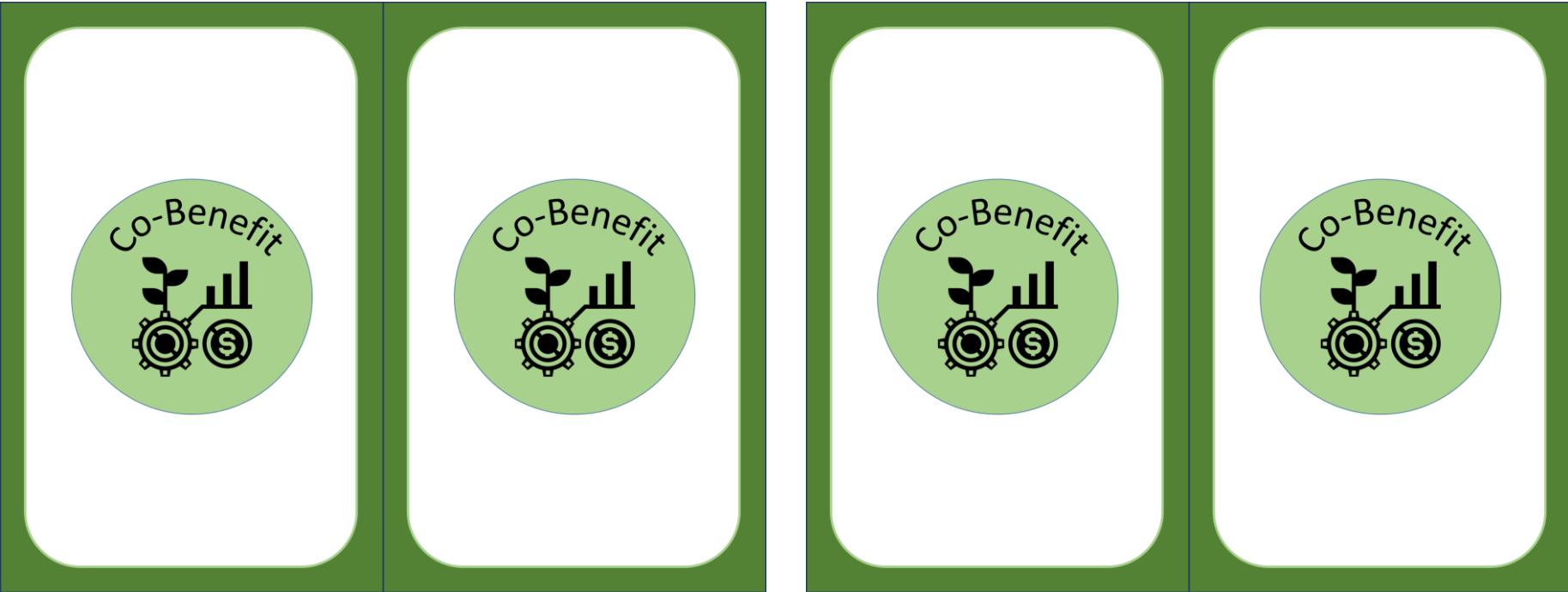
Transport

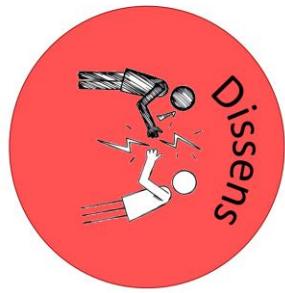


Pipeline

Transport von CO_2 per Pipeline

Pipelines können große Mengen komprimierten CO_2 effizient und mit relativ geringen Betriebsemissionen transportieren. Sie eignen sich für einen kontinuierlichen, langfristigen Transport zu Speicherstätten. Der Bau von Pipelines erfordert jedoch Flächen, Energie und sorgfältige Sicherheitsmaßnahmen, um Leckagen zu vermeiden. Im Betrieb sind die Umweltwirkungen in der Regel geringer als beim Transport per Lkw.





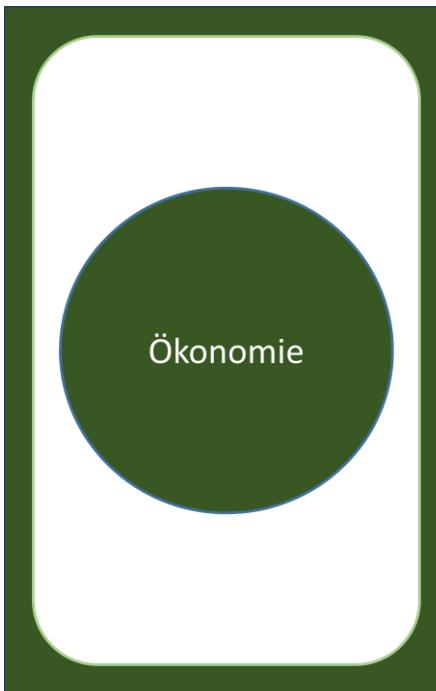




Ökonomie



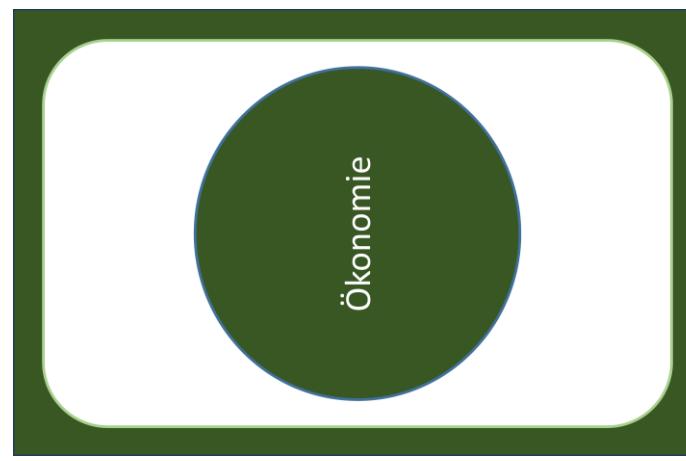
Ökonomie



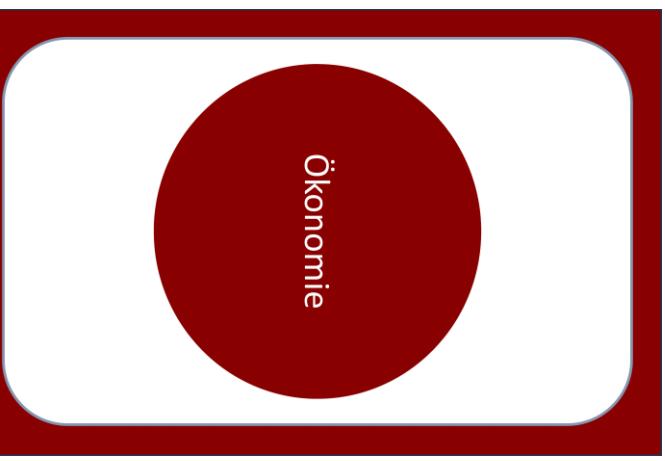
Ökonomie



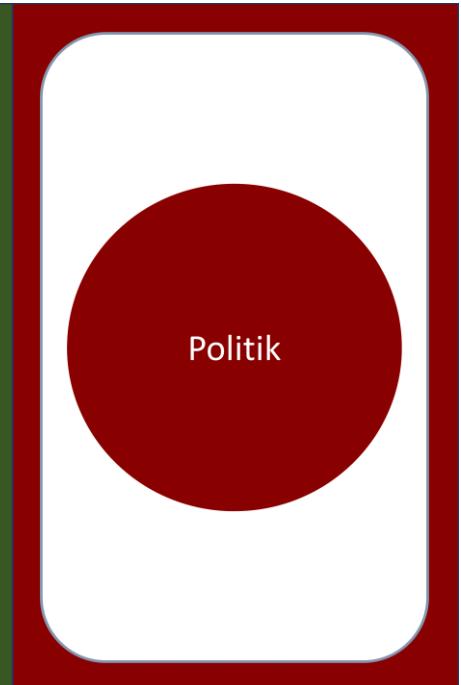
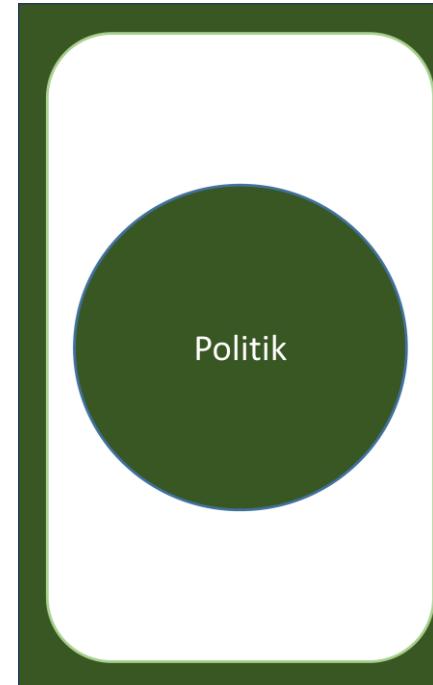
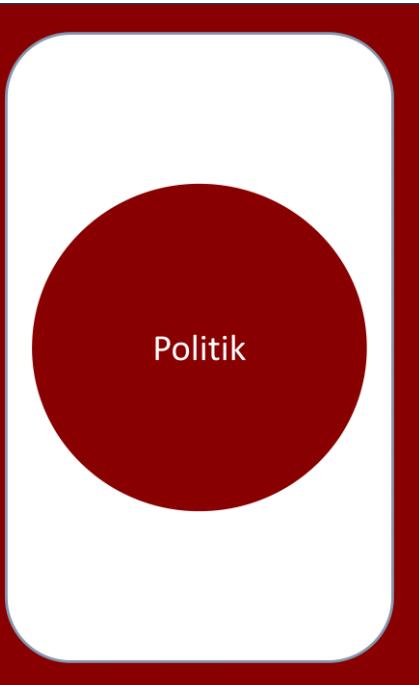
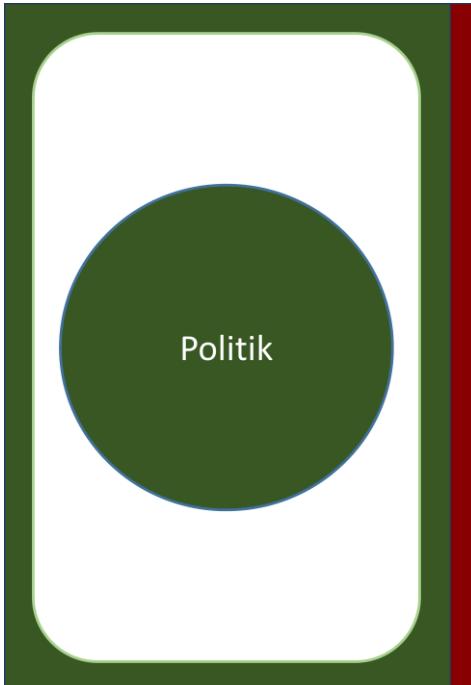
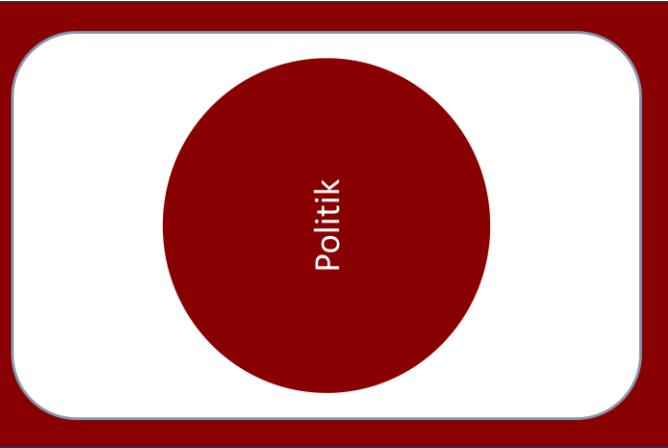
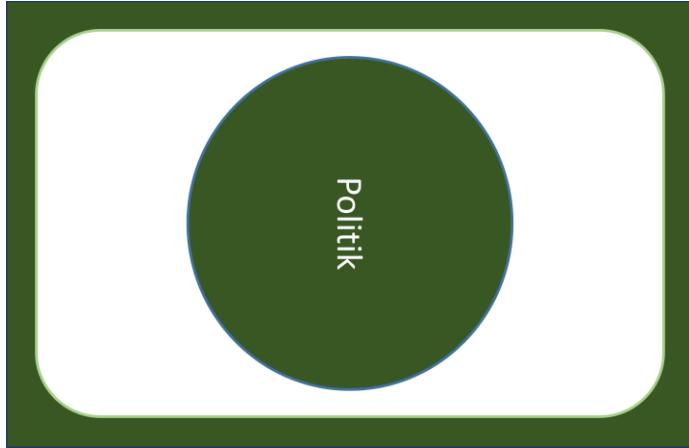
Ökonomie

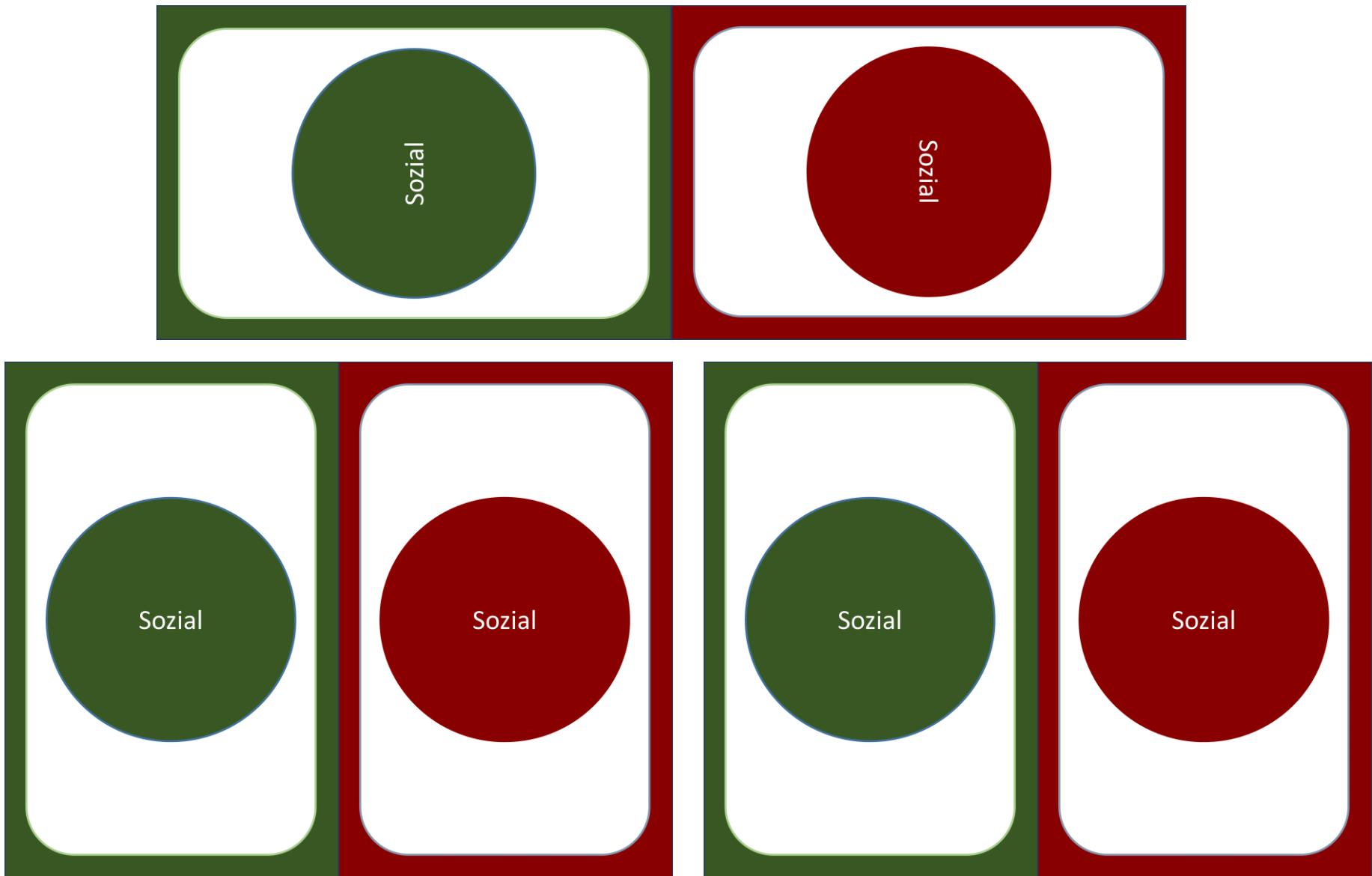


Ökonomie



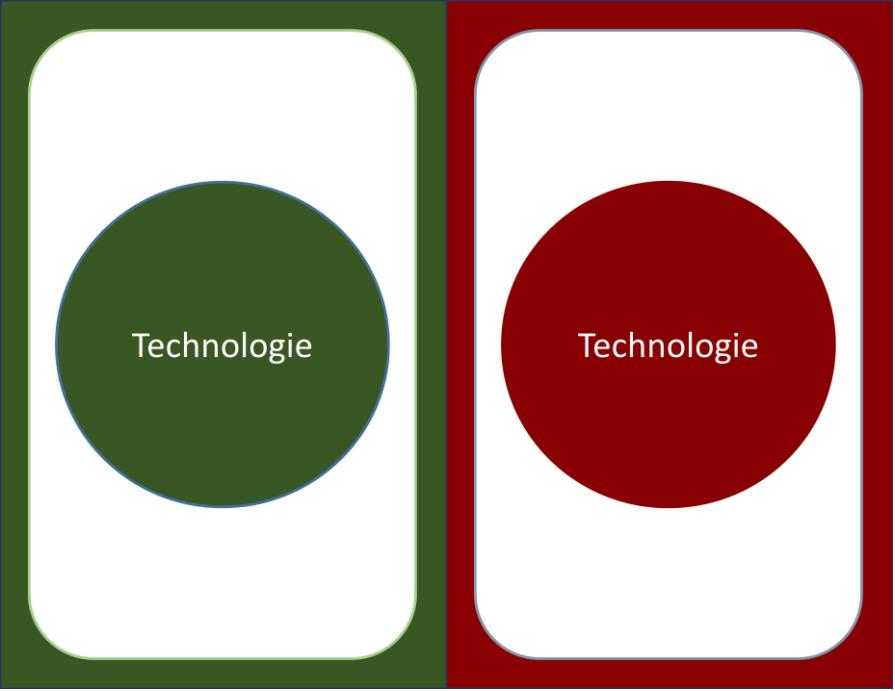
Ökonomie



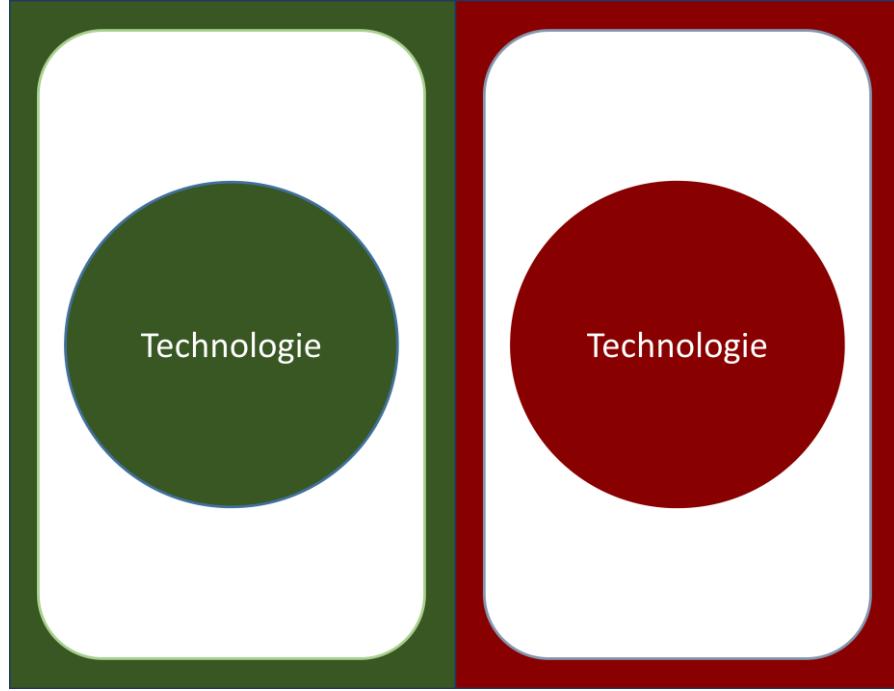




Technologie



Technologie



Technologie

