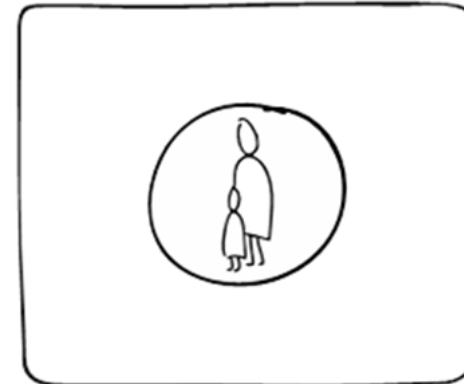
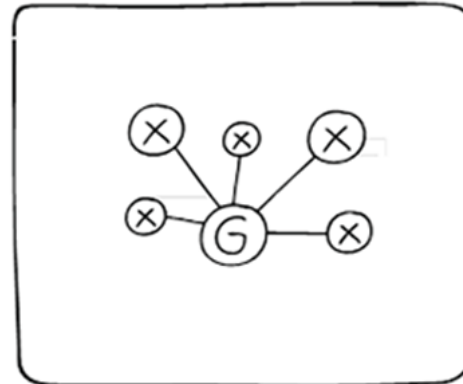
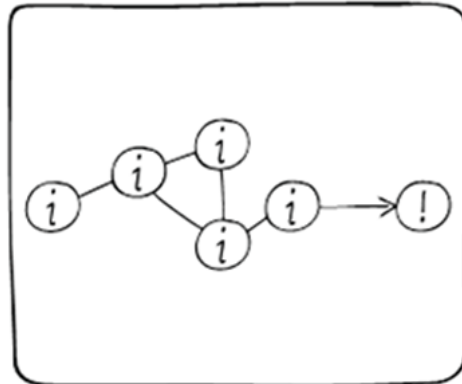
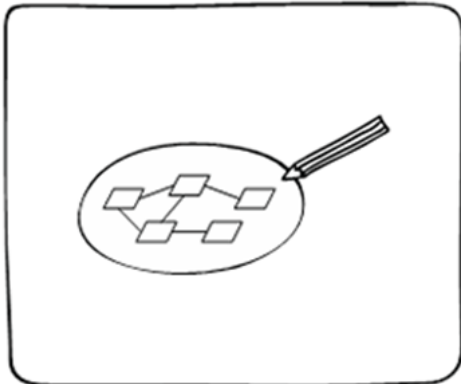
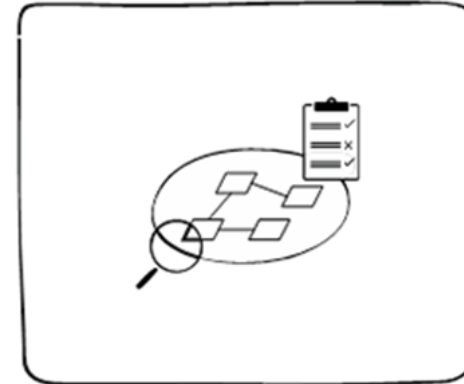
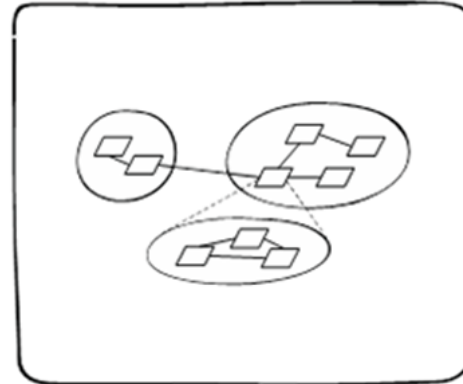
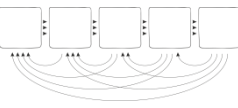


Was hat Systemdesign mit dem Klimawandel zu tun?



[GIF]





Ein systemanalytischer Ansatz zur Internalisierung der Klimawirkung der Luftfahrt

Disputationsvortrag von Malte Niklaß

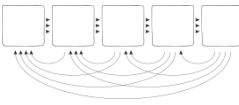


TUHH

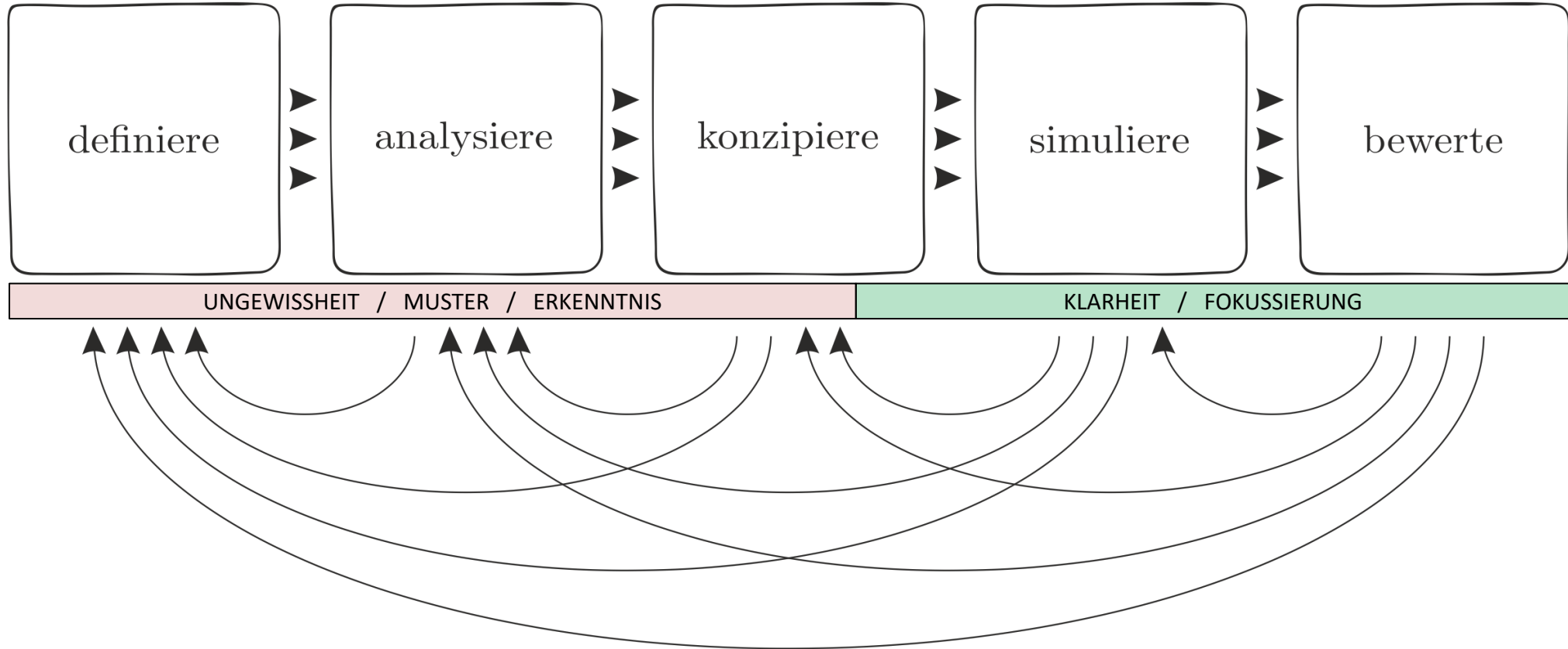
TUDelft

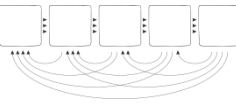
Wissen für Morgen



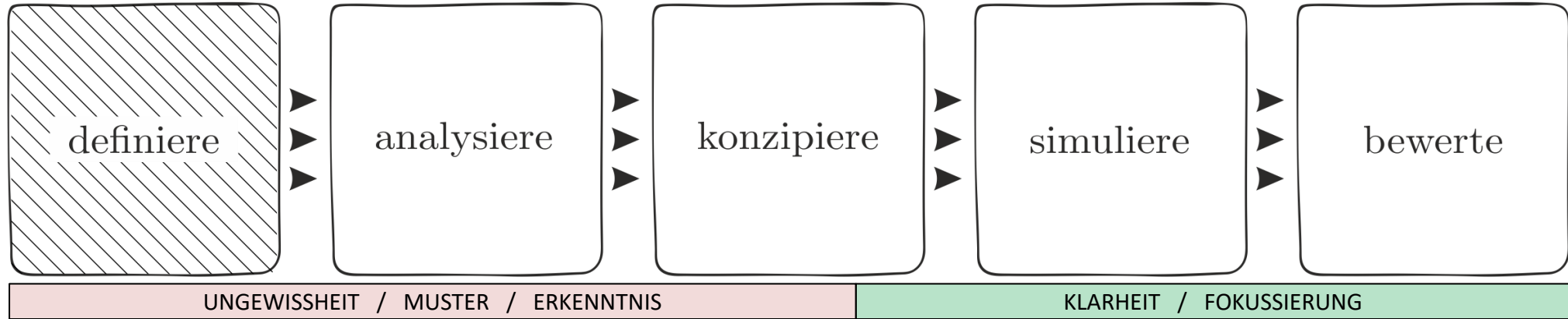


Der systemanalytische Ansatz dieser Arbeit (Agenda)



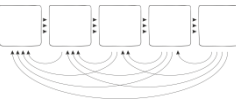


Initiale Problemdefinition

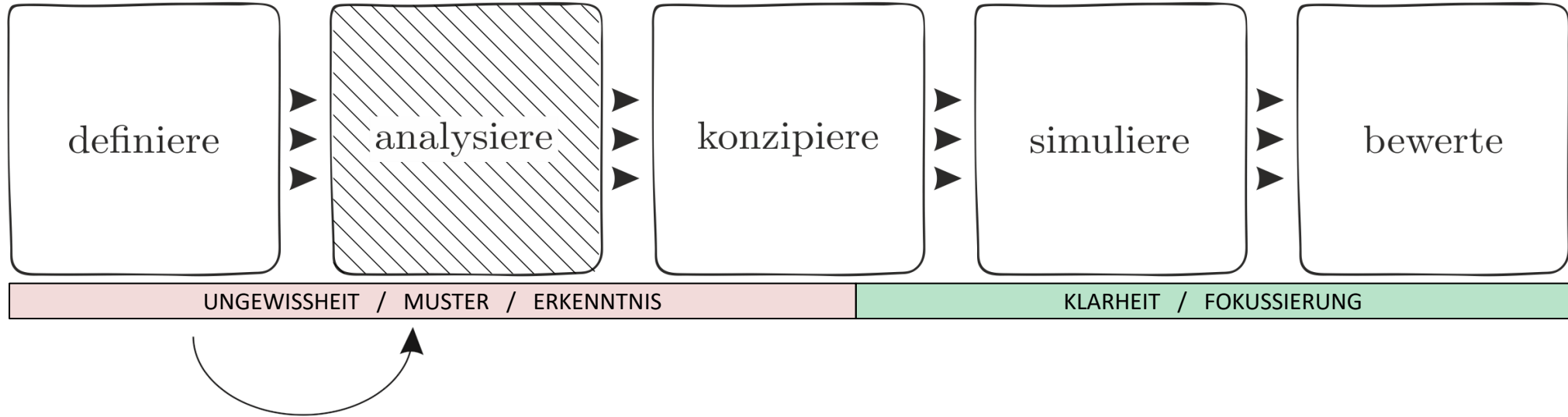


Wie kann der Lufttransport klimafreundlicher gestaltet werden?



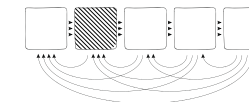


Initiale Problemdefinition



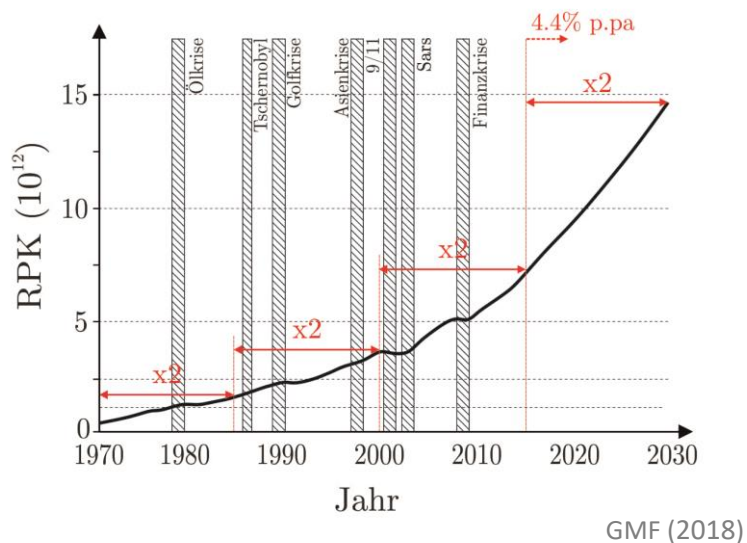
Wie kann der Lufttransport klimafreundlicher gestaltet werden?





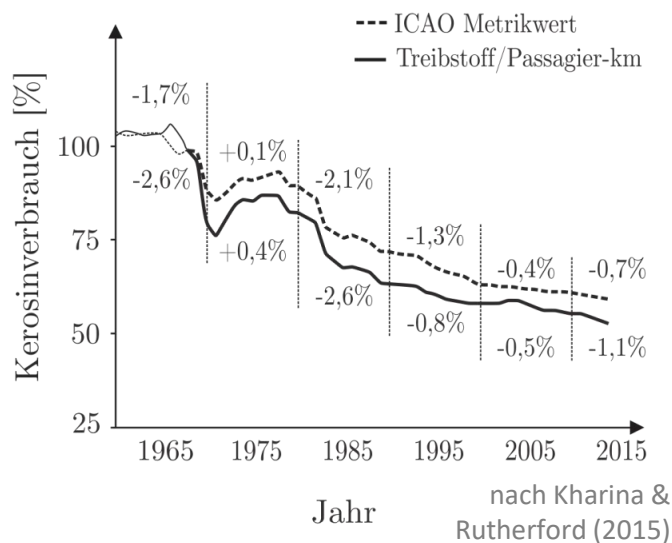
Klimaschutz im Luftverkehr: eine systemanalytische Herausforderung

Weltweites Luftverkehrswachstum



Die Beförderungsleistung des Lufttransports verdoppelt sich alle 15 Jahre ...

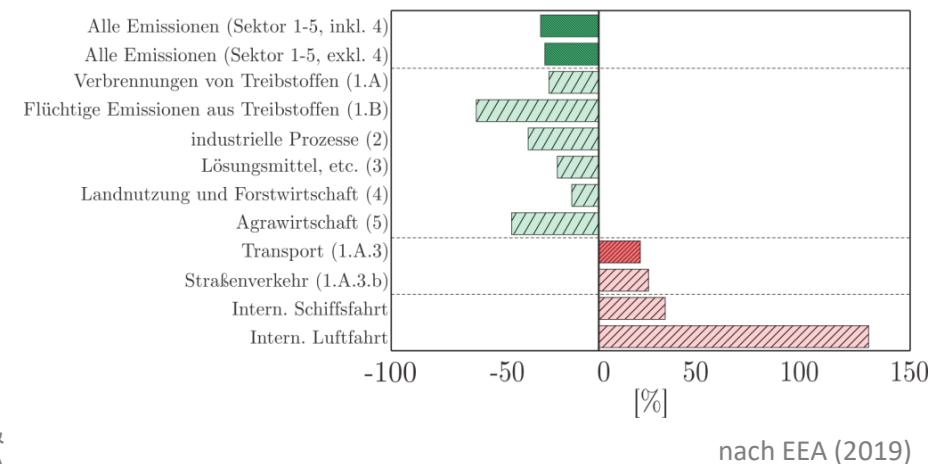
Hist. Treibstoffverbesserungsrate



... und übersteigt die jährliche Treibstoffverbesserungsrate des Lufttransports.

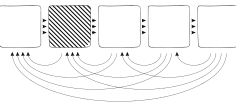
EU-Emissionen 1990-2017

relative Änderung der EU Emissionen von 1990-2017



Der prozentuale Anteil an Luftverkehrsemissionen wird weiter zunehmen.





Klimaschutz im Luftverkehr: eine systemanalytische Herausforderung

Direkte Klimawirkung von Luftverkehrsemissionen

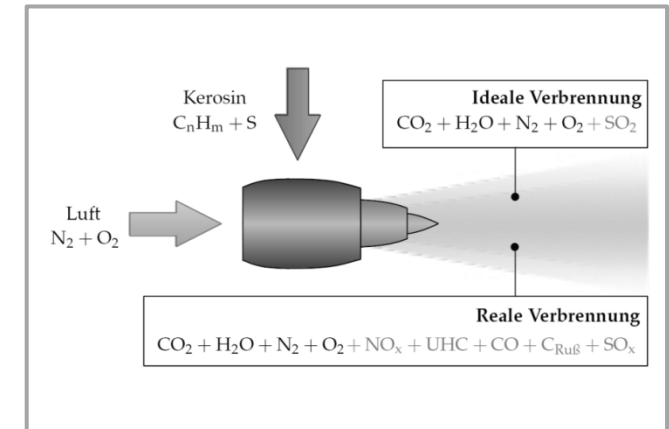
Die Klimawirkung ist abhängig von:

- Emissionsart
- Emissionsmenge



Shutterstock

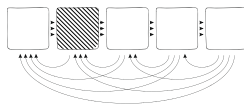
Luftverkehrsemissionen haben einen direkten Einfluss auf das Klima.



nach IPCC (1999)

Art und Menge der Emissionen lassen sich punktuell gut messen und modellieren.





Klimaschutz im Luftverkehr: eine systemanalytische Herausforderung

Indirekte Klimawirkung von Luftverkehrsemissionen

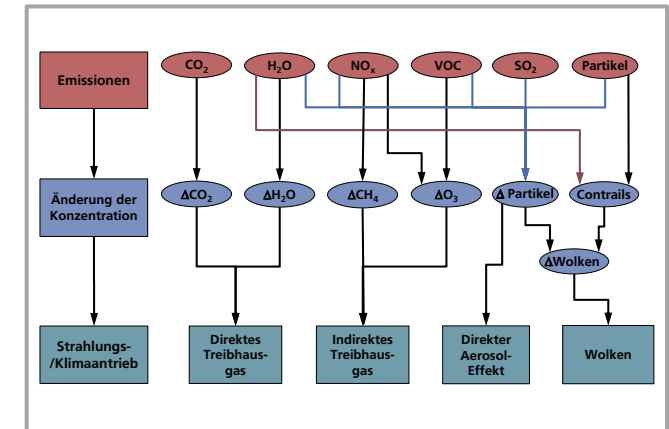
Die Klimawirkung ist abhängig von:

- Emissionsart
- Emissionsmenge
- Emissionsort (insbesondere Flughöhe)
- Emissionszeitpunkt
- Wetterverhältnisse



Shutterstock

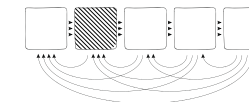
Indirekte Effekte entstehen u.a. durch die Bildung von Kondensstreifen und Ozon.



nach IPCC (1999)

Wirkungen stark abhängig von Ort (insbesondere Höhe) und Zeitpunkt der Emissionen.



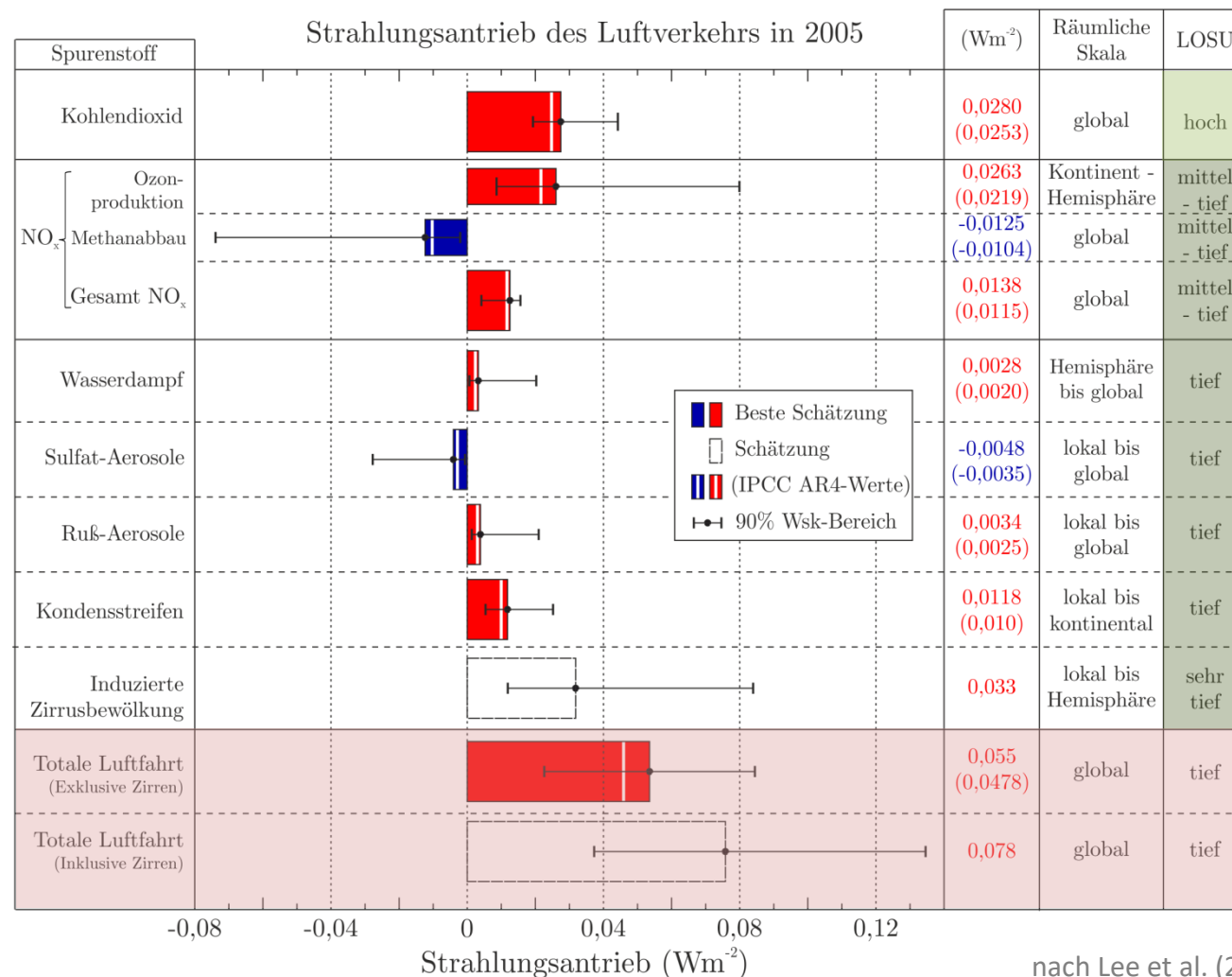


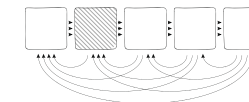
Klimaschutz im Luftverkehr: eine systemanalytische Herausforderung

Klimawirkung des Luftverkehrs nicht proportional zum Treibstoffverbrauch

Die Klimawirkung ist abhängig von:

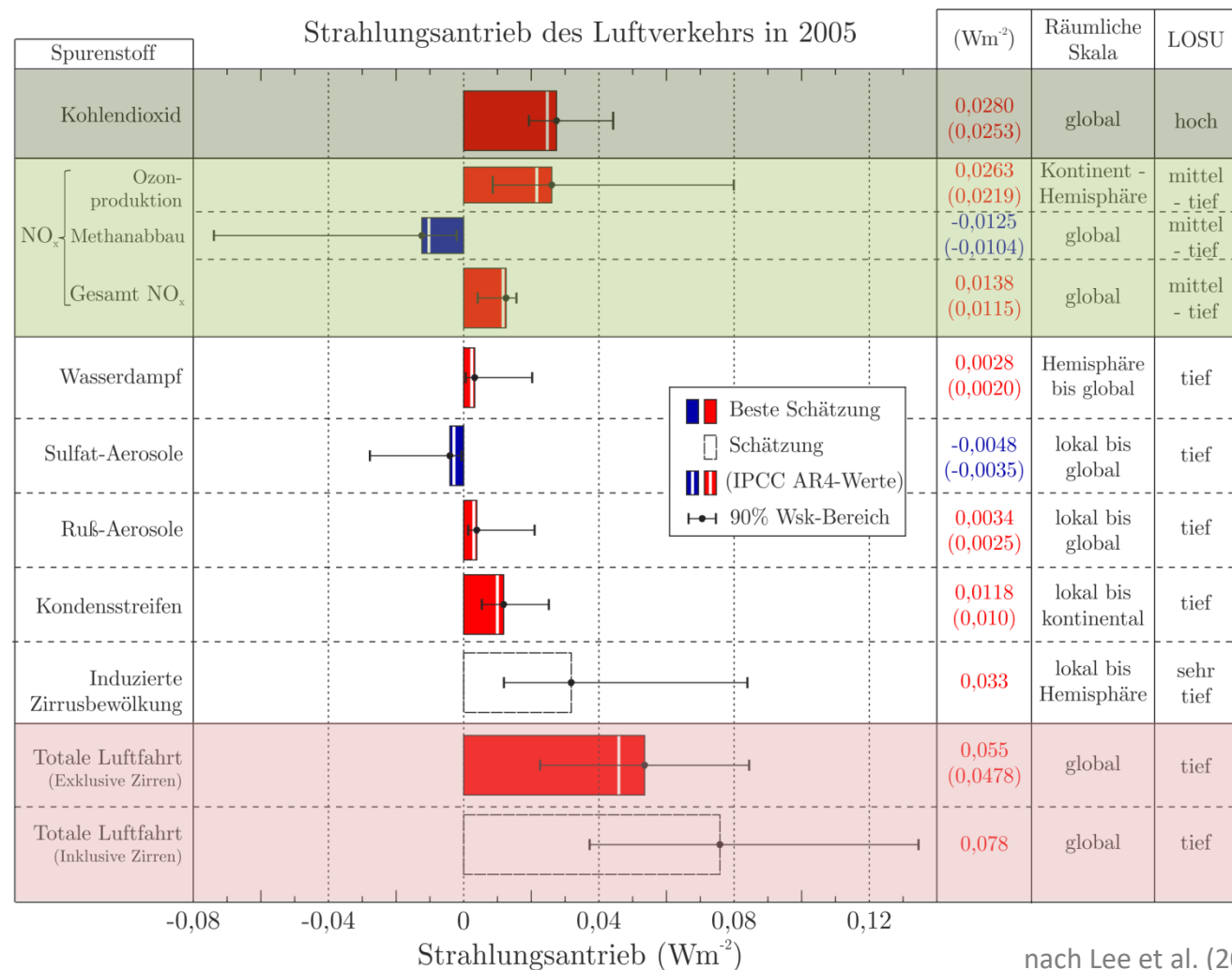
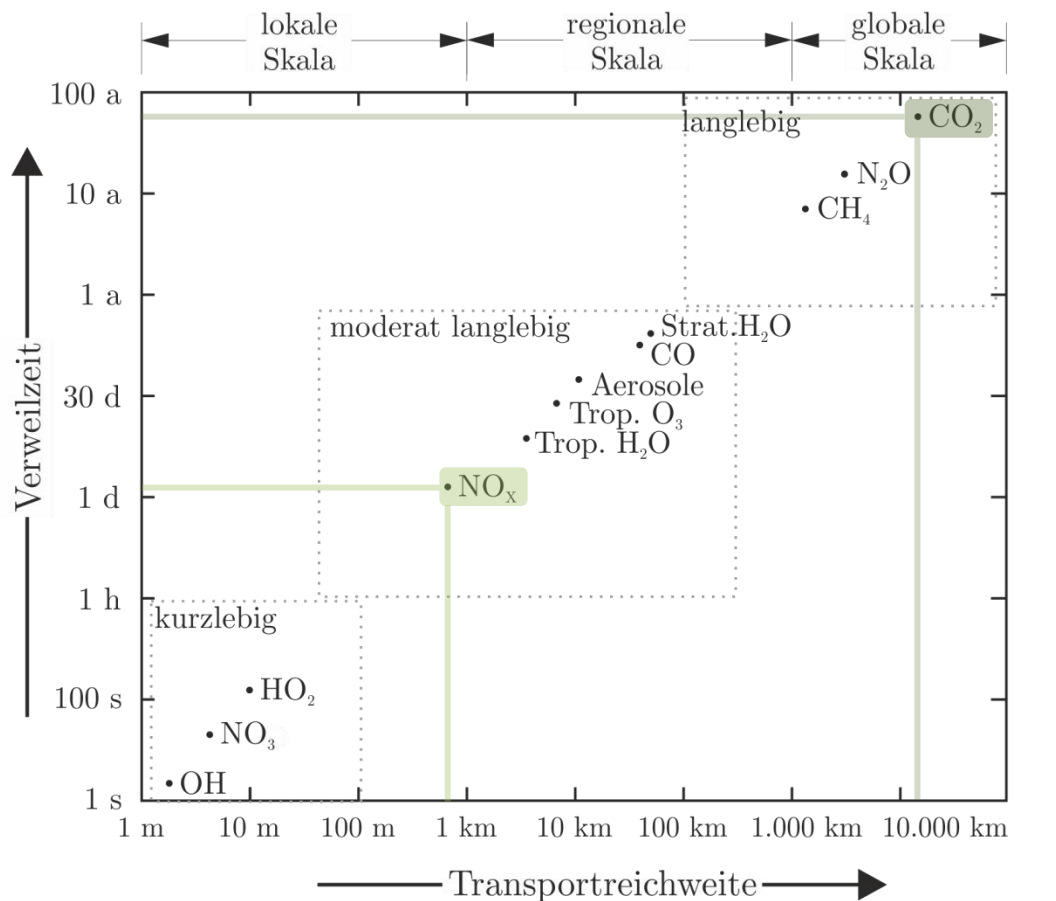
- Emissionsart
- Emissionsmenge
- Emissionsort (insbesondere Flughöhe)
- Emissionszeitpunkt
- Wetterverhältnisse

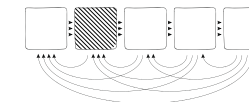




Klimaschutz im Luftverkehr: eine systemanalytische Herausforderung

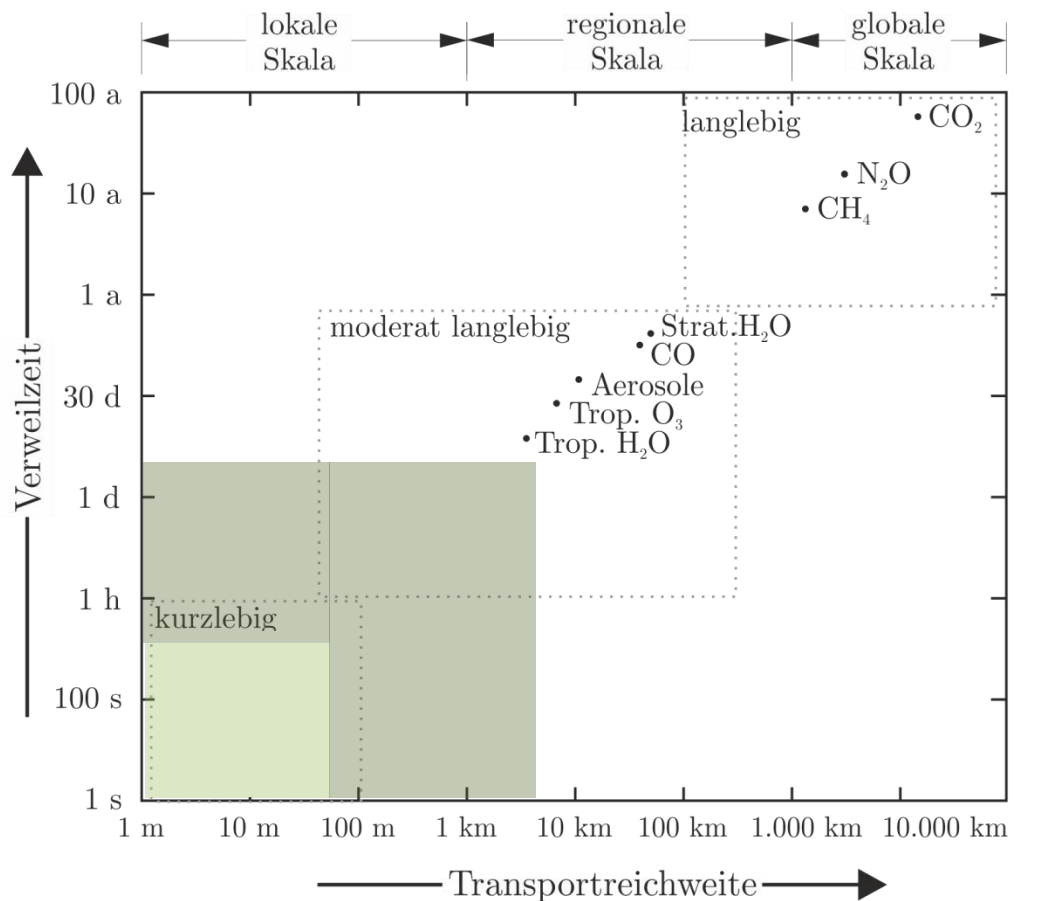
Klimawirkung des Luftverkehrs nicht proportional zum Treibstoffverbrauch



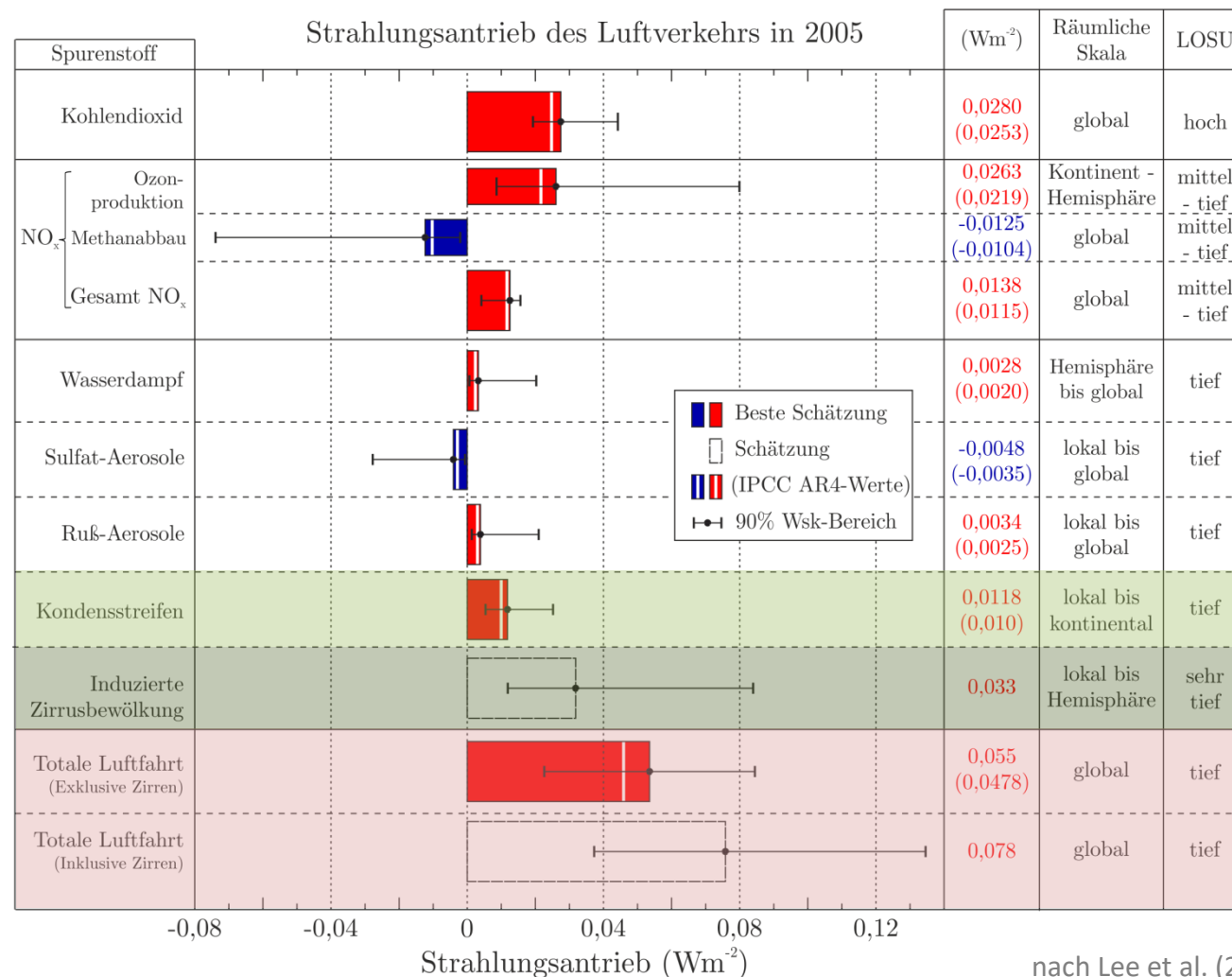


Klimaschutz im Luftverkehr: eine systemanalytische Herausforderung

Klimawirkung des Luftverkehrs somit nicht proportional zum Treibstoffverbrauch

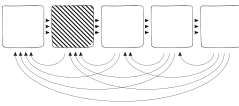


nach Brasseur et al. (1999)



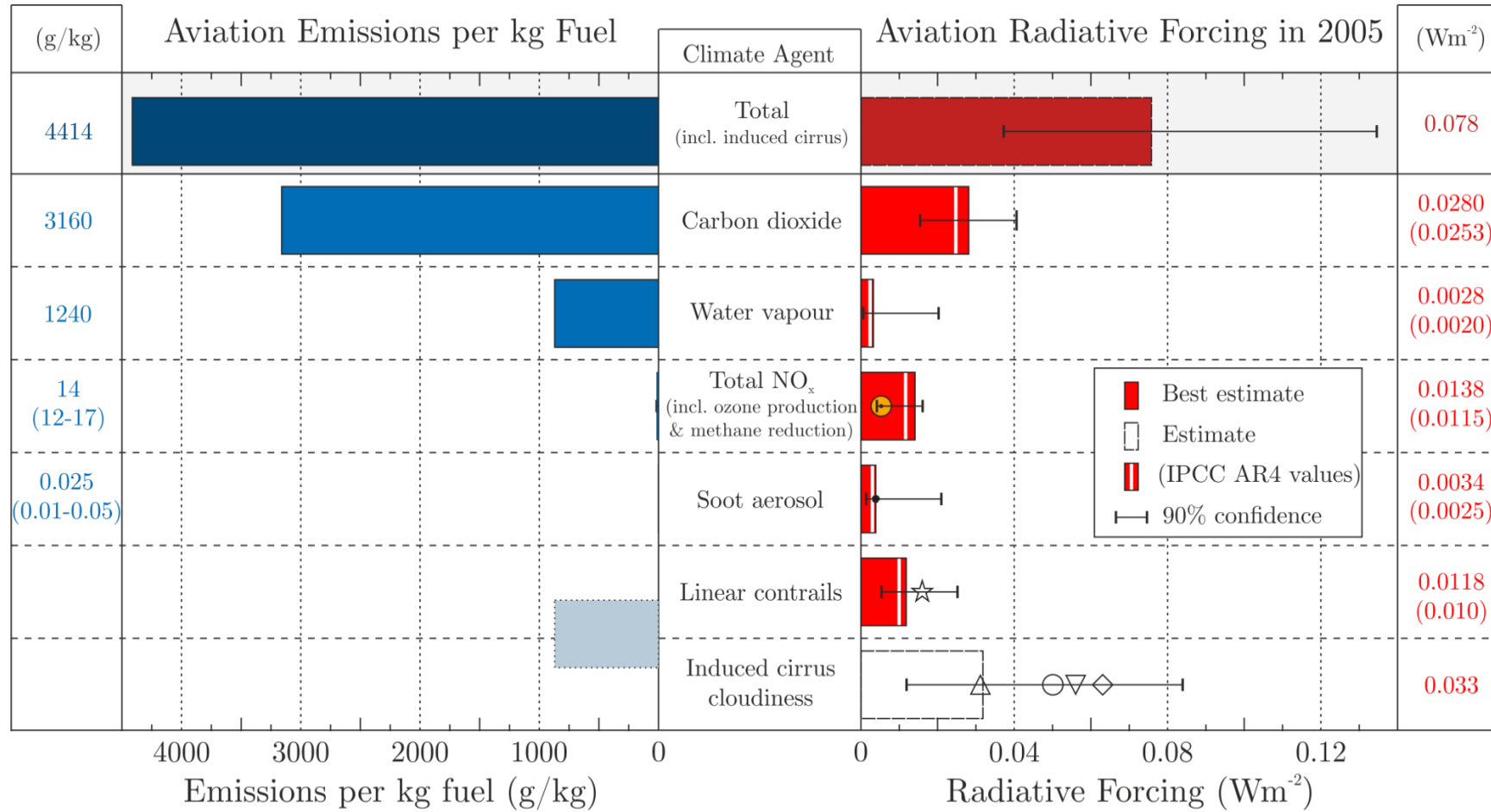
nach Lee et al. (2010)





Klimaschutz im Luftverkehr: eine systemanalytische Herausforderung

Klimawirkung des Luftverkehrs nicht proportional zum Treibstoffverbrauch

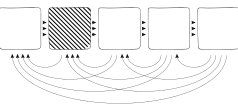


▨ Indirect impact of water vapour and soot emissions

- Søvde et al. (2014): multi-model mean
- Schumann and Graf (2013)
- △ Burkhardt and Kärcher (2011)
- ◇ Bock and Burkhardt (2016)
- ☆ Voigt et al. (2011)
- ▽ Schumann et al. (2015)

In Veröffentlichung Niklaß et al. (2019)

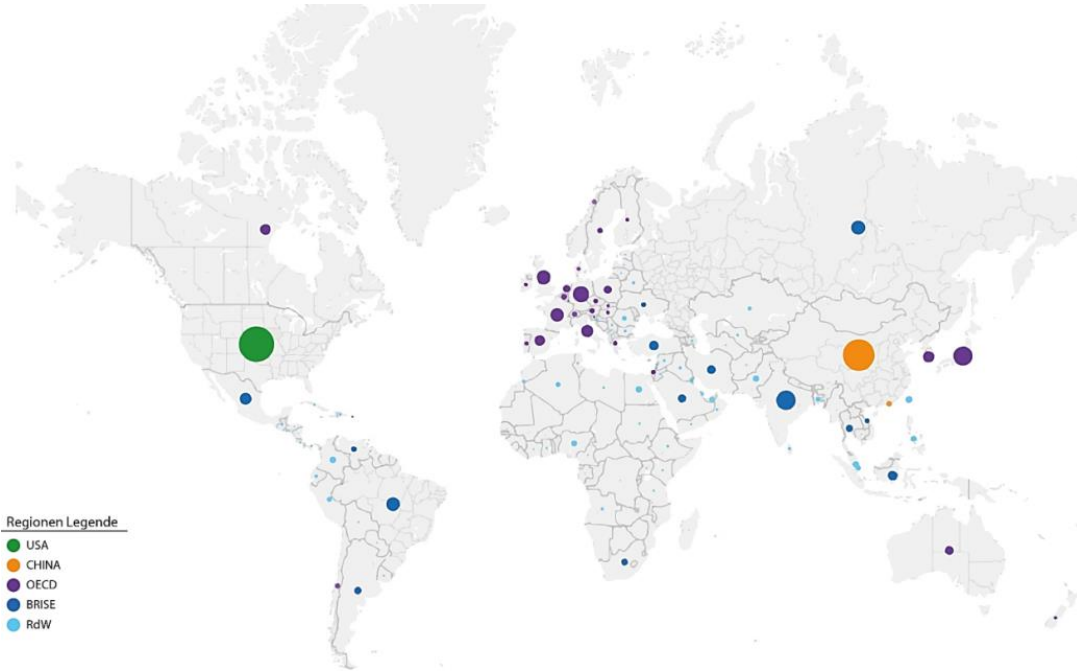




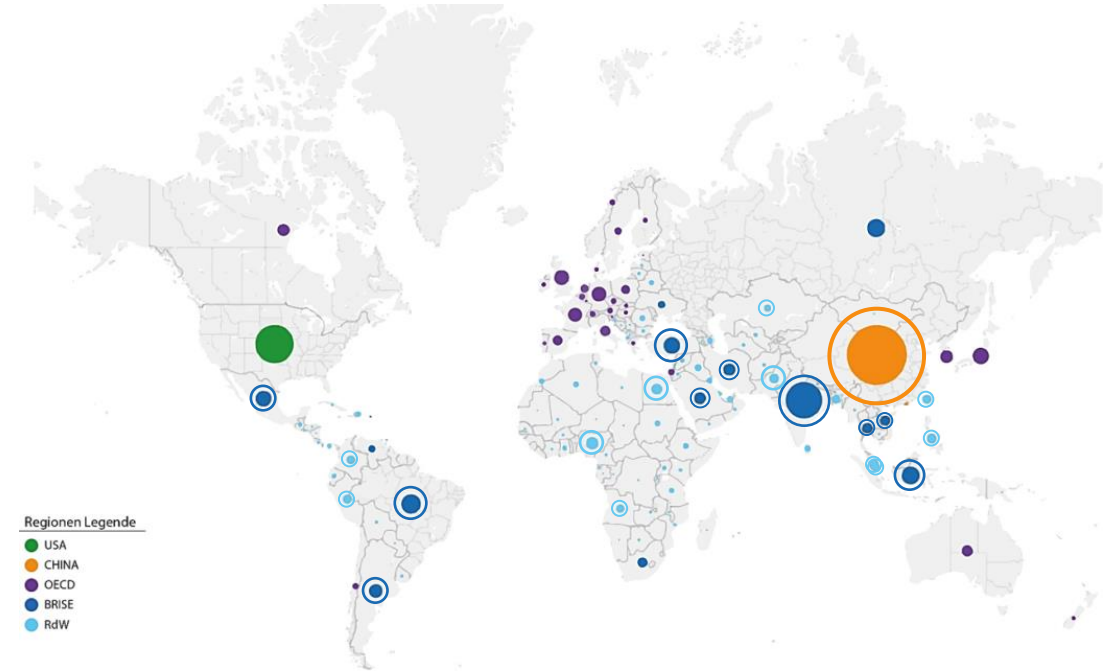
Klimaschutz im Luftverkehr: eine systemanalytische Herausforderung

Prognostiziertes Wachstum des Bruttoinlandsprodukts von 2012 bis 2050

2012



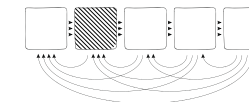
2050



nach Becker (2014)

- Inhomogenes BIP-Wachstum führt zu großen regionalen Unterschieden im Luftverkehrswachstum
- Menge und räumliche Verteilung zukünftiger Luftverkehrsemissionen wird maßgeblich die Klimawirkung der Luftfahrt beeinflussen!





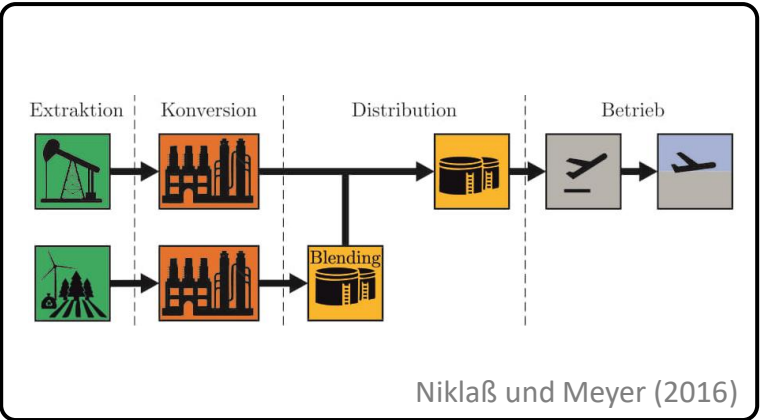
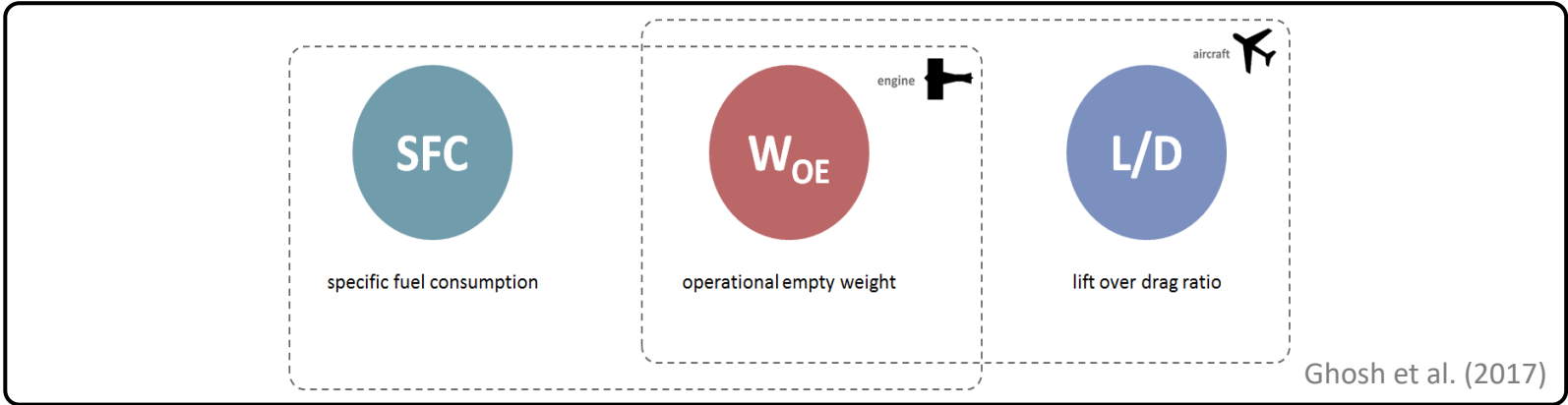
Operationelle & technologische Mitigationsmöglichkeiten in der Luftfahrt

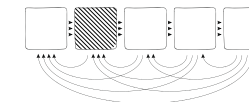
Reduktion der Emissionsmenge

1. Durch alle Technologien, die den spez. Treibstoffverbrauch (SFC), das Gewicht (w_{OE}) und/oder die Aerodynamik (L/D) reduzieren
2. Durch alternative Kraftstoffe, die den Kohlenstoffkreislauf schließen
3. Durch alle operationellen Maßnahmen, die die Effizienz der Flugführung verbessern

Veränderung der Emissionsart

Veränderung des Emissionsortes & -zeitpunktes





Operationelle & technologische Mitigationsmöglichkeiten in der Luftfahrt

Reduktion der Emissionsmenge

1. Durch alle Technologien, die den spez. Treibstoffverbrauch (SFC), das Gewicht (w_{OE}) und/oder die Aerodynamik (L/D) reduzieren
2. Durch alternative Kraftstoffe, die den Kohlenstoffkreislauf schließen
3. Durch alle operationellen Maßnahmen, die die Effizienz der Flugführung verbessern

Veränderung der Emissionsart

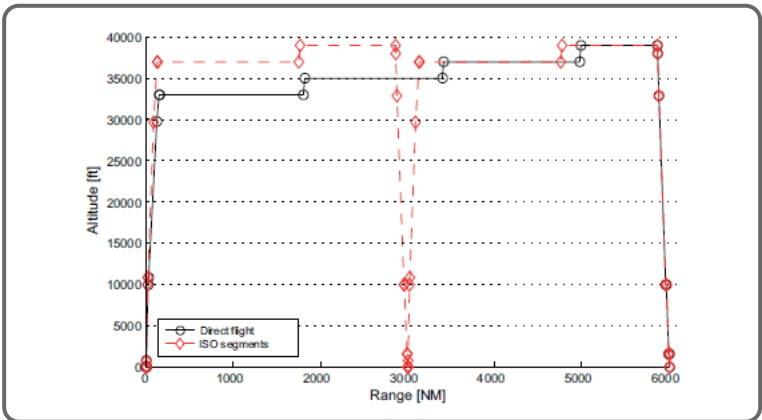
Beispiel:
Intermediate Stop Operations

	O ₃ ^{pm}	CH ₄	CO ₂	H ₂ O	O ₃	Contrails	
ATR _{ref}	-4.7%	-14.1%	14.7%	5.2%	54.8%	44.3%	100%
ΔATR _{ISO}	-4%	-4%	-4.9%	+24.2%	+2.5%	-0.8%	+2.3%

Klimawirkung kann trotz Reduktion der Emissionsmenge steigen!

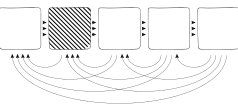
Emissions-einsparpotential	Maximal	Global
CO ₂ , H ₂ O, SO ₂	-15%	-4,8%
NO _x	-14%	-4,6%
HC		+43,4%
CO		+33,3%

Veränderung des Emissionsortes & -zeitpunktes



ATR := Average Temperature Response

Nach Linke (2016)



Operationelle & technologische Mitigationsmöglichkeiten in der Luftfahrt

Reduktion der Emissionsmenge

1. Durch alle Technologien, die den spez. Treibstoffverbrauch (SFC), das Gewicht (w_{OE}) und/oder die Aerodynamik (L/D) reduzieren
2. Durch alternative Kraftstoffe, die den Kohlenstoffkreislauf schließen
3. Durch alle operationellen Maßnahmen, die die Effizienz der Flugführung verbessern

Veränderung der Emissionsart

1. Durch Herstellung synthetischer (Designer-)Treibstoffe ohne Rückstände von Schwefel, etc.
2. Durch Verwendung kohlenstofffreier Treibstoffe, wie Wasserstoff
3. Durch elektrisches Fliegen

Veränderung des Emissionsortes & -zeitpunktes

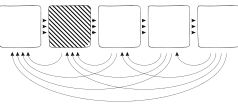


©DLR



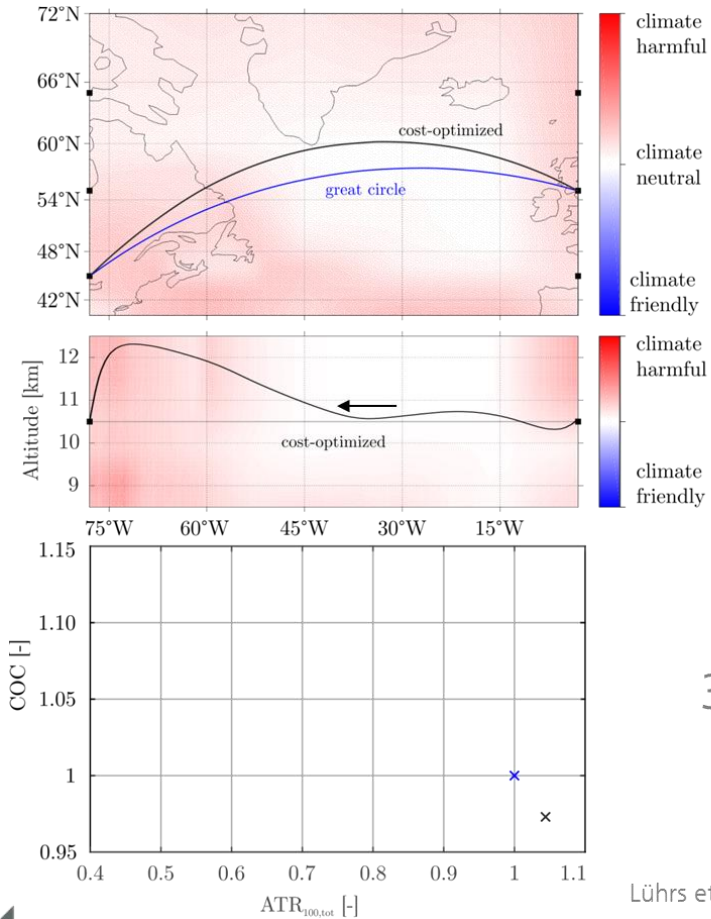
©Bauhaus Luftfahrt



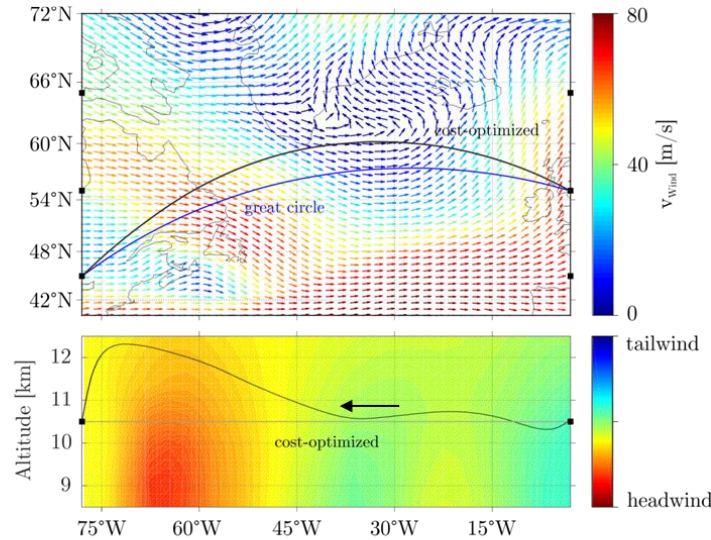


Operationelle & technologische Mitigationsmöglichkeiten in der Luftfahrt

Reduktion der Emissionsmenge



Veränderung der Emissionsart



3D

Lührs et al. (2016)

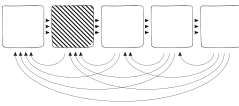
monetary weighting	1.000
climate weighting	0.000
COC	0.973
ATR	1.044
fuel	0.960
flight time	0.979
mean altitude	11,252 m

Veränderung des Emissionsortes & -zeitpunktes

- Durch teilweises oder vollständiges Umfliegen klimasensitiver Gebiete

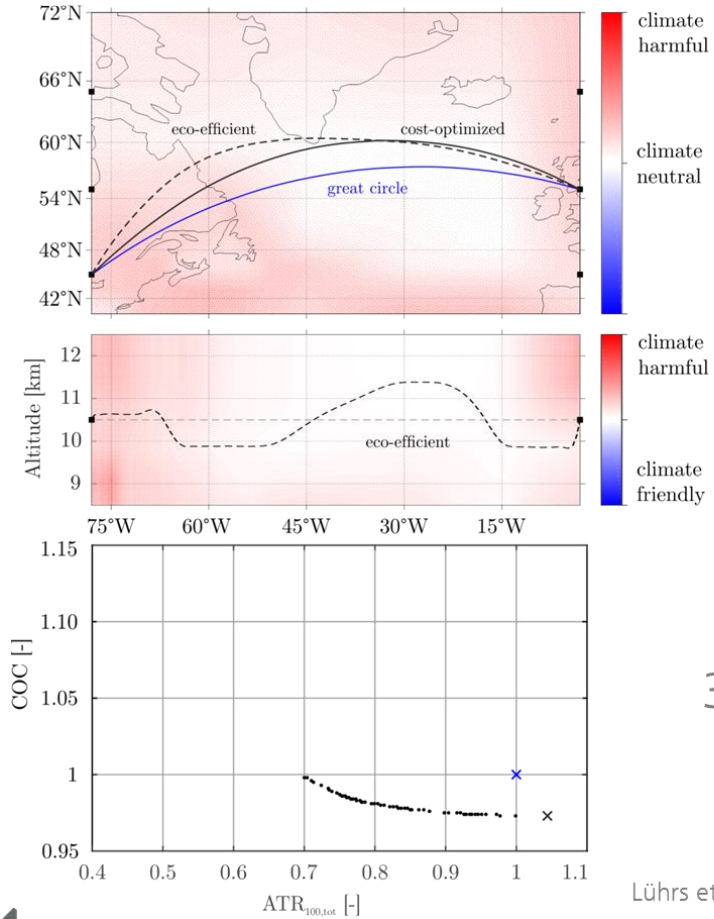
ATR := Average Temperature Response



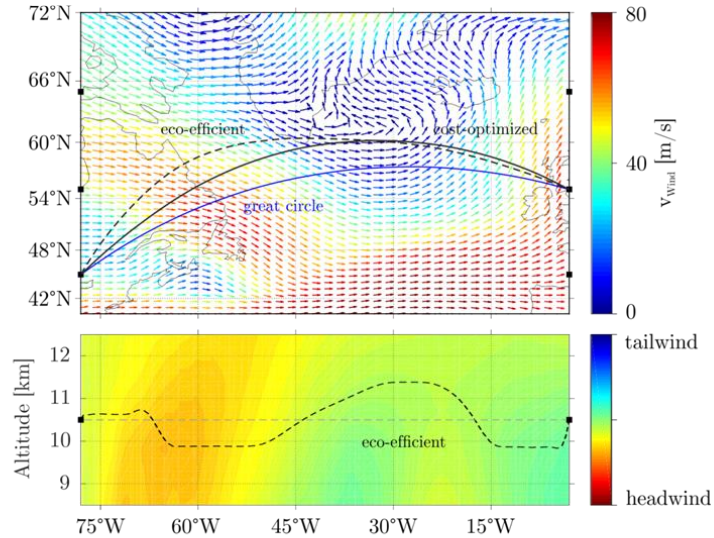


Operationelle & technologische Mitigationmöglichkeiten in der Luftfahrt

Reduktion der Emissionsmenge



Veränderung der Emissionsart



3D

Lührs et al. (2016)

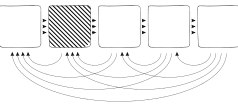
monetary weighting	0.736
climate weighting	0.264
COC	0.998
ATR	0.700
fuel	1.002
flight time	0.994
mean altitude	10,461 m

Veränderung des Emissionsortes & -zeitpunktes

- Durch teilweises oder vollständiges Umfliegen klimasensitiver Gebiete

ATR := Average Temperature Response



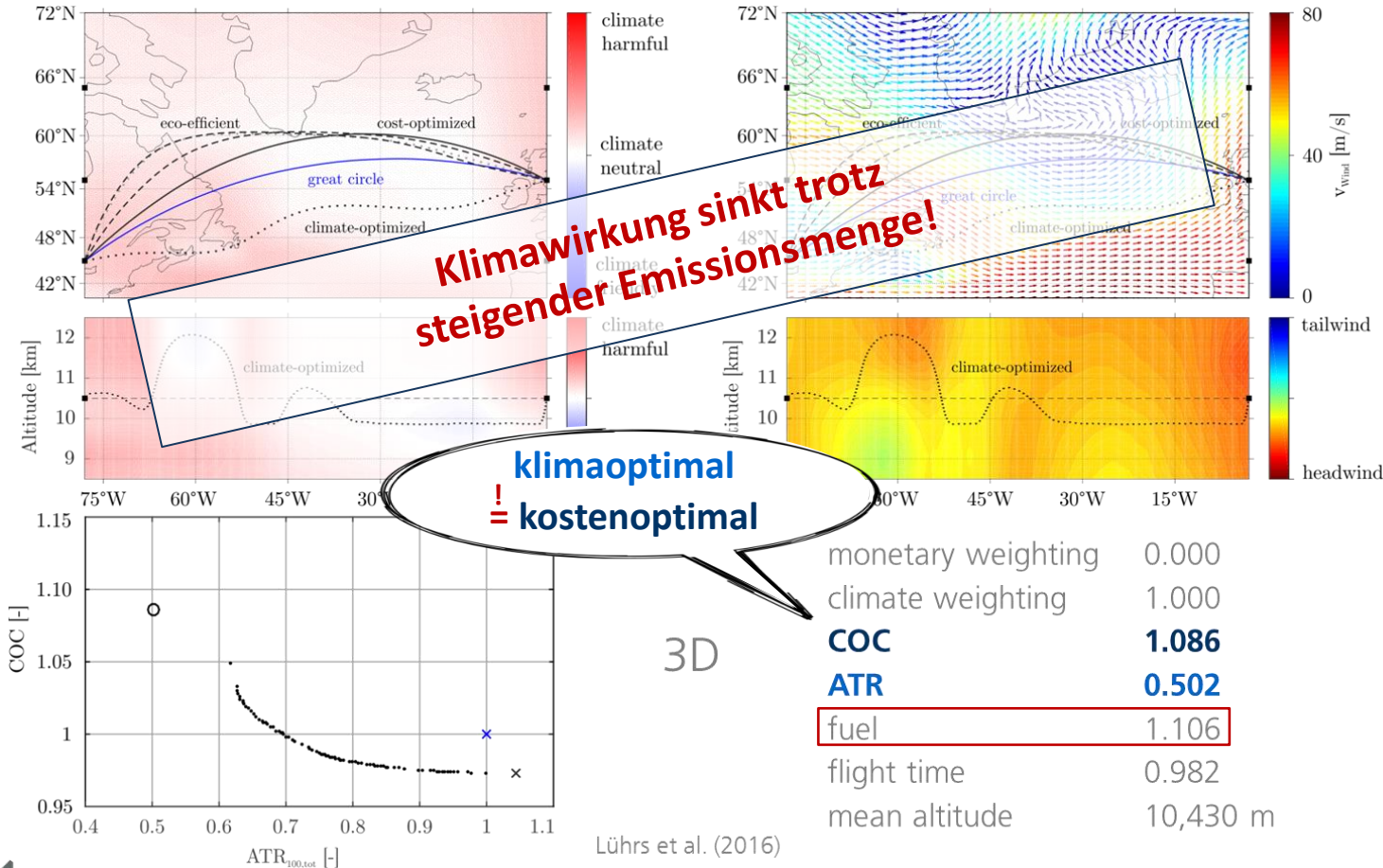


Operationelle & technologische Mitigationmöglichkeiten in der Luftfahrt

Reduktion der Emissionsmenge

Veränderung der Emissionsart

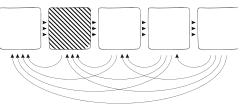
Veränderung des Emissionsortes & -zeitpunktes



- Durch teilweises oder vollständiges Umfliegen klimasensitiver Gebiete

ATR := Average Temperature Response

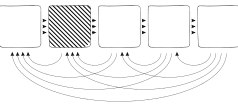




Identifizierter Zielkonflikt

Klimafreundliches Fliegen ist nicht wirtschaftlich

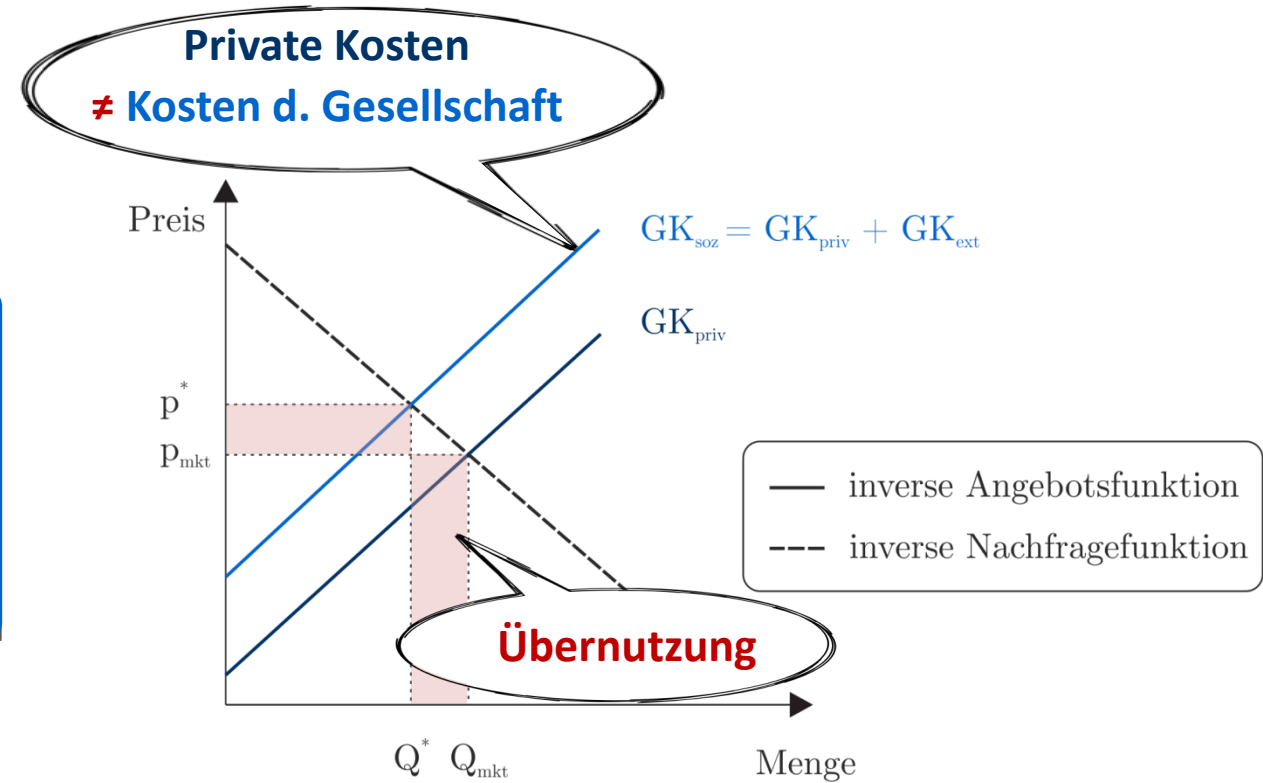




Allokationsproblem von knappen Umweltgütern

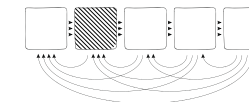
Externe Effekte im umweltökonomischen Kontext

	Ausschließbarkeit	keine Ausschließbarkeit
Rivalität	Private Güter <i>u. a. Fischbrötchen, Obazda</i>	Allmendegut <i>u. a. Fischbestände, öfftl. Straße</i>
keine Rivalität	Club-Güter <i>u. a. Boxverein, EU</i>	Öffentliche Güter <i>u. a. Luft, Wasser, Wissen</i>



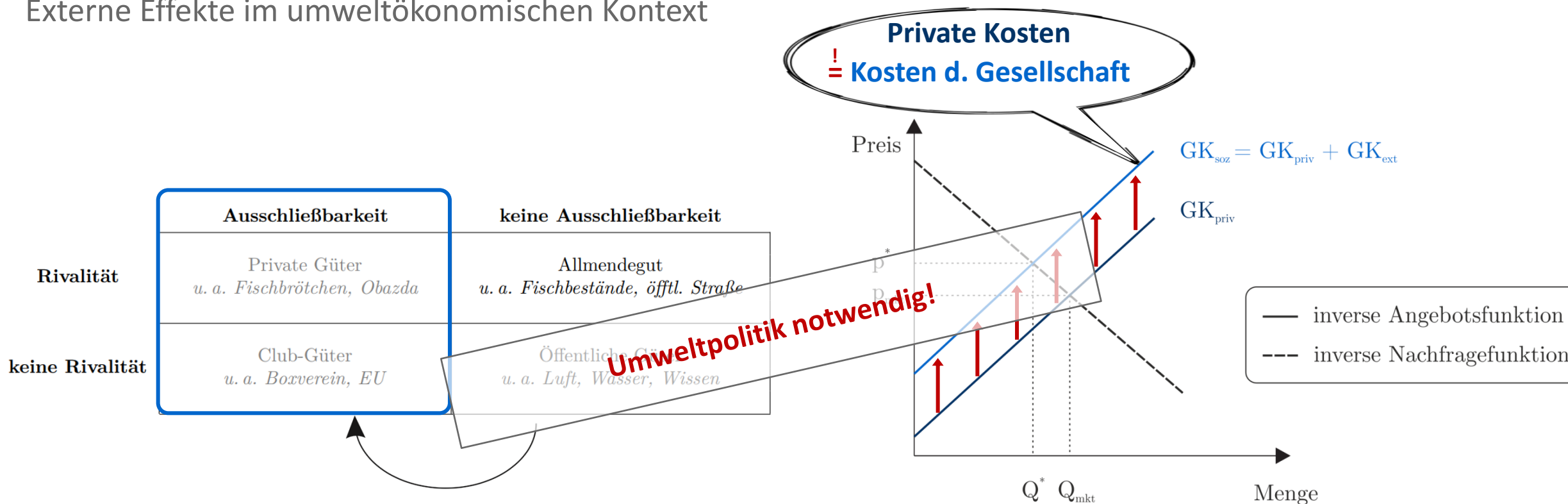
Knappe, frei verfügbare Güter sind durch Übernutzung bedroht, da ihr Nutzen ohne Gegenleistung erlangt werden kann (Trittbrettfahrerproblematik).





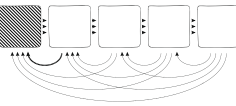
Allokationsproblem von knappen Umweltgütern

Externe Effekte im umweltökonomischen Kontext

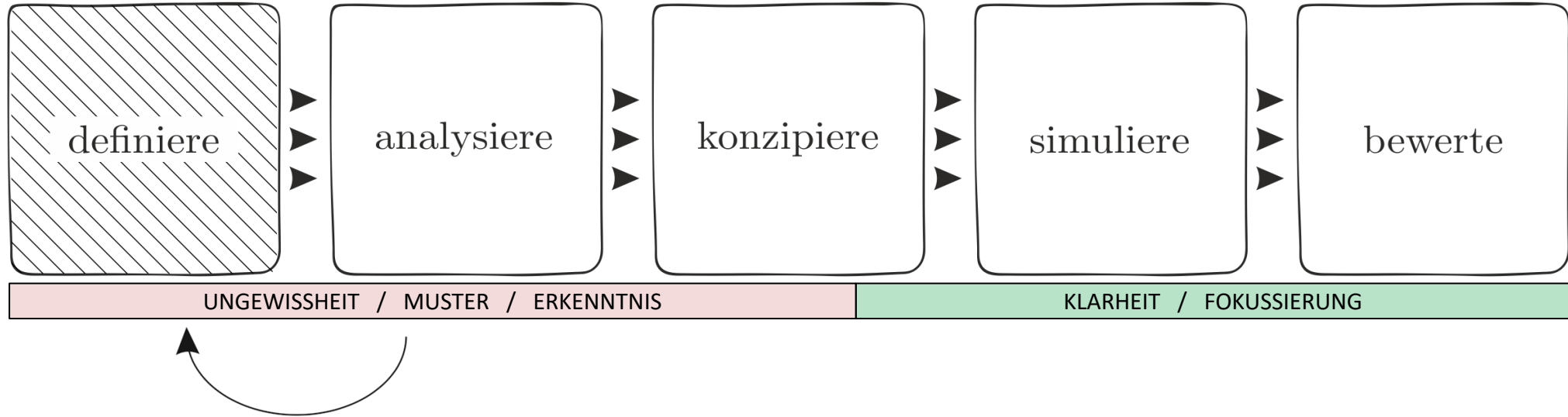


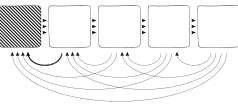
Knappe, frei verfügbare Güter sind durch Übernutzung bedroht, da ihr Nutzen ohne Gegenleistung erlangt werden kann (Trittbrettfahrerproblematik).





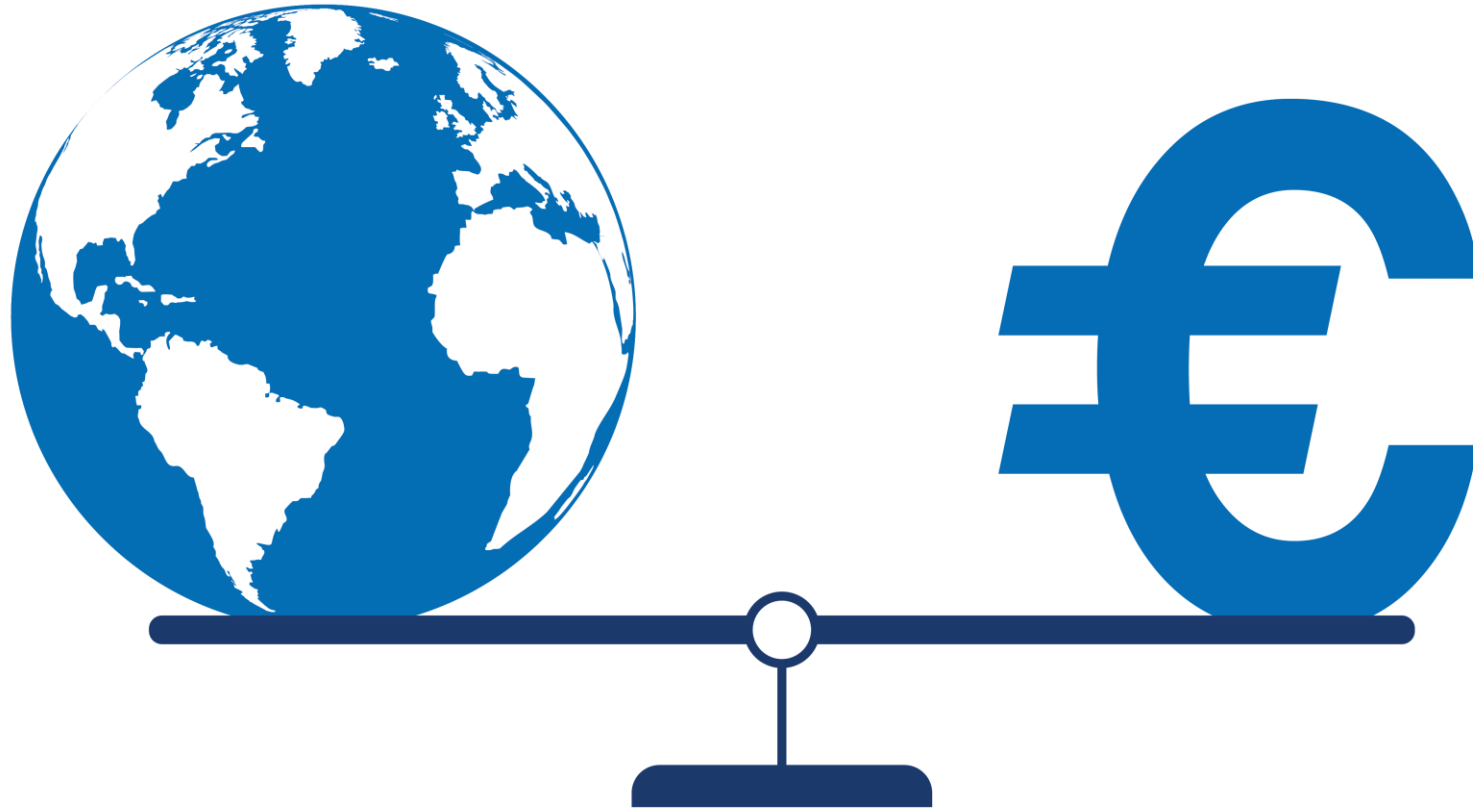
Zielsetzung der Arbeit

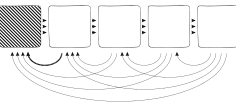




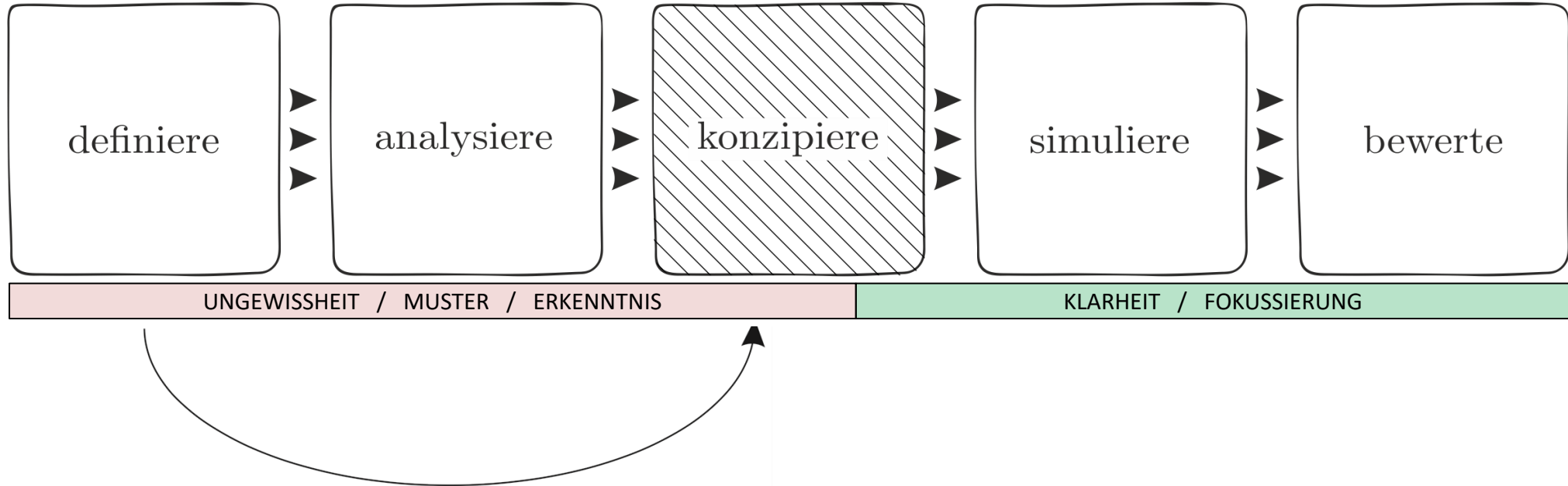
Zielsetzung der Arbeit

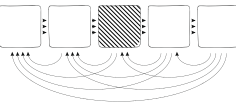
Wie können wir klimafreundliches Fliegen wirtschaftlich gestalten?





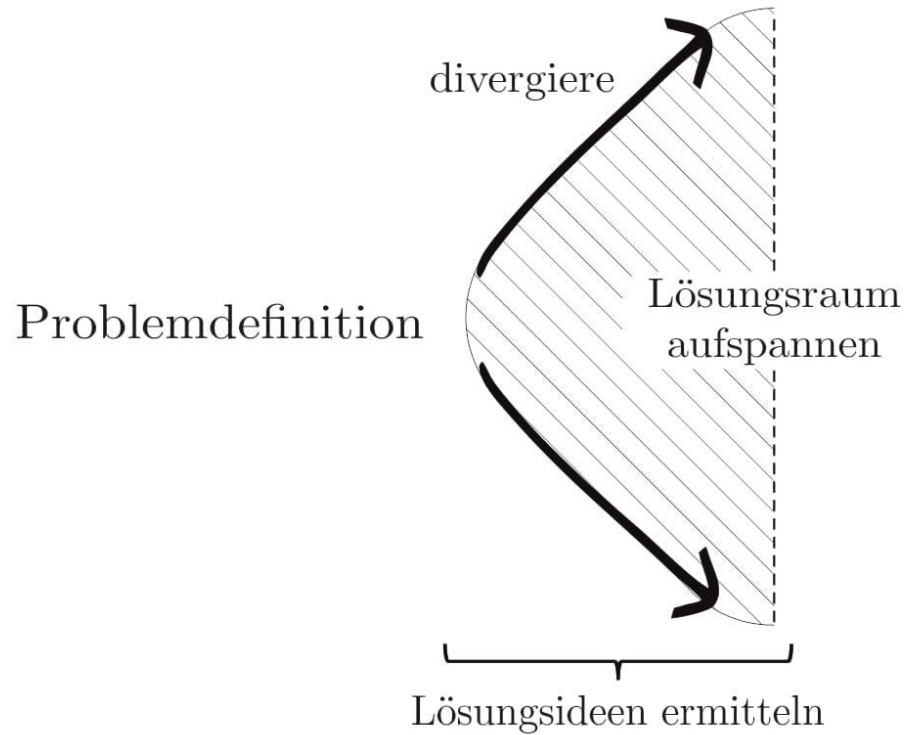
Zielsetzung der Arbeit





Konzeptentwurf von Lösungsalternativen

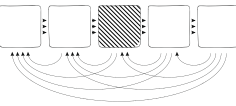
Methode der kontrollierten Konvergenz von Lösungskonzepten



"The best way to have a good idea is to have plenty ideas." (*Linus Pauling*)

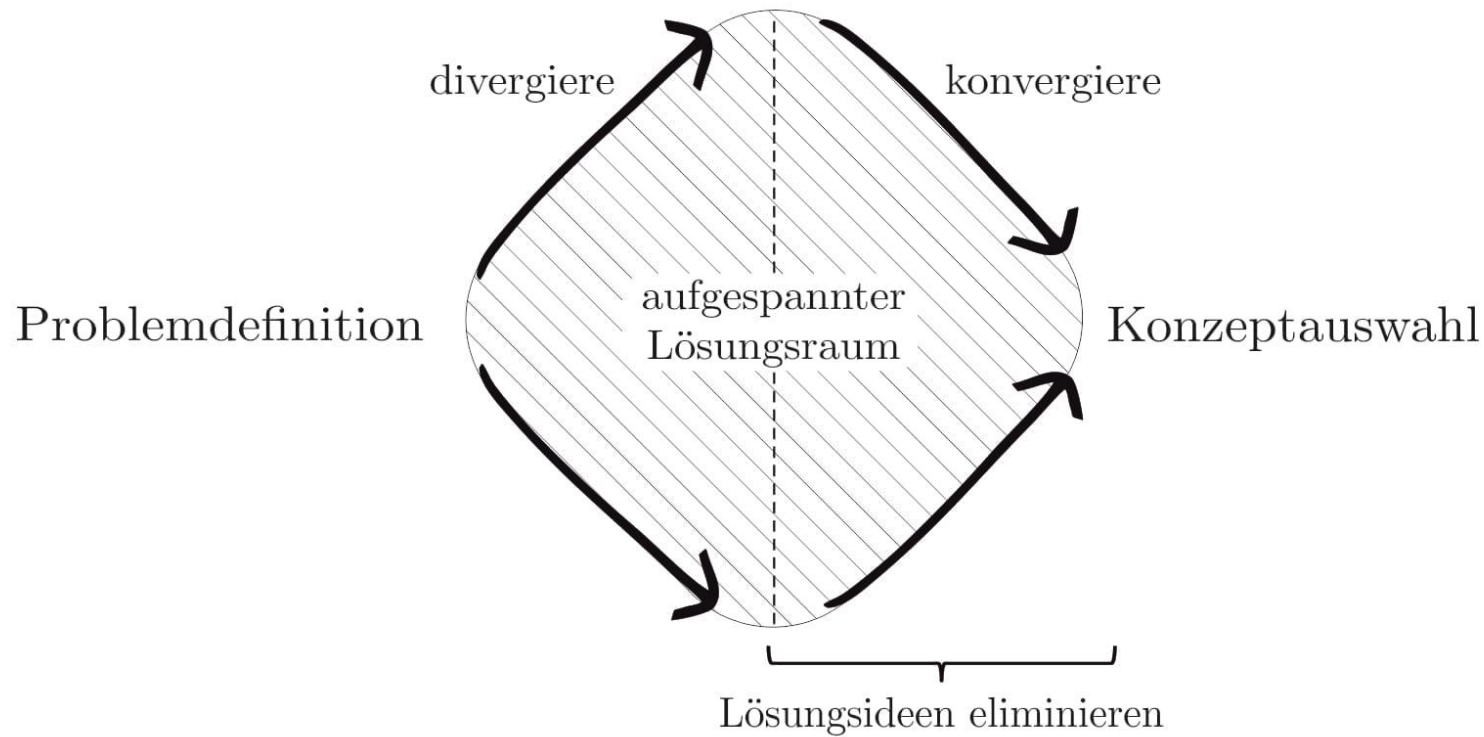
angelehnt an Pugh (1991); IDEO (2012)





Konzeptentwurf von Lösungsalternativen

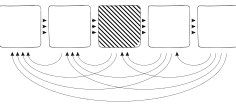
Methode der kontrollierten Konvergenz von Lösungskonzepten



"The best way to have a good idea is to have plenty ideas." (*Linus Pauling*)

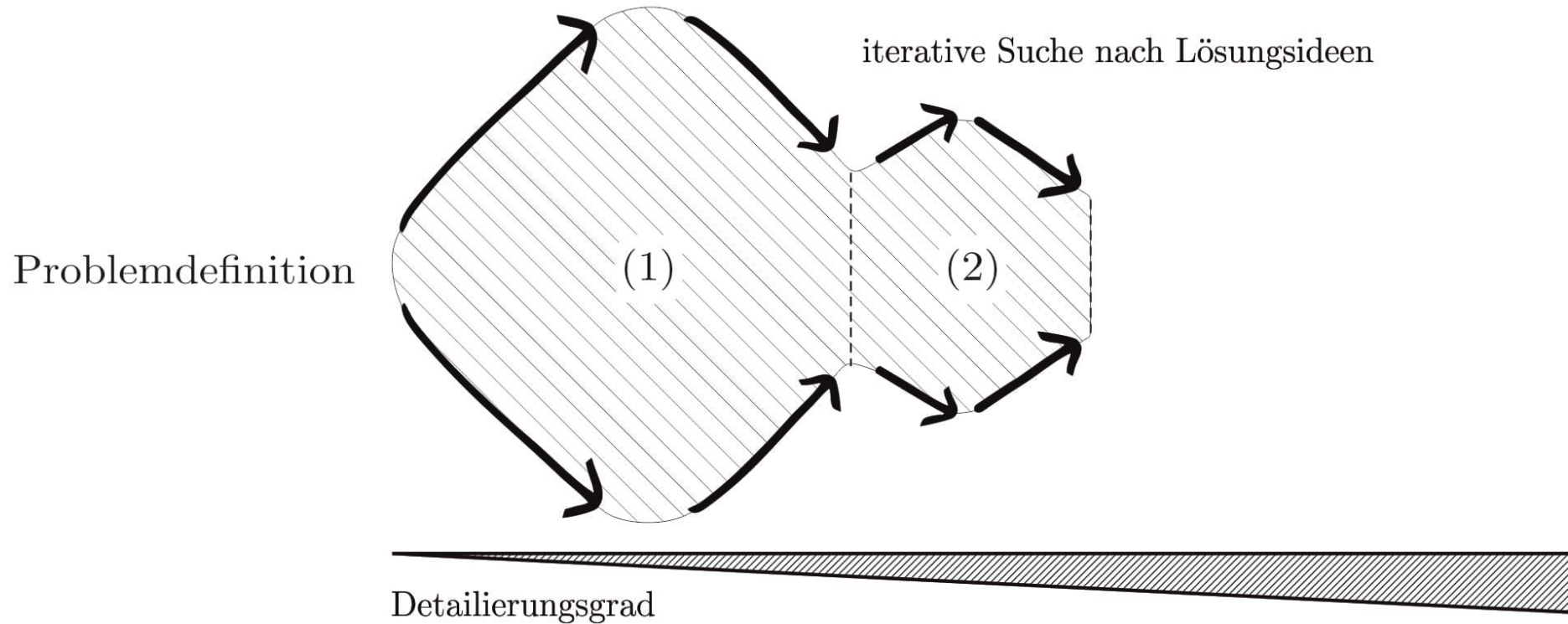
angelehnt an Pugh (1991); IDEO (2012)





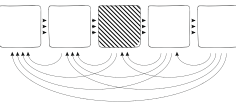
Konzeptentwurf von Lösungsalternativen

Methode der kontrollierten Konvergenz von Lösungskonzepten



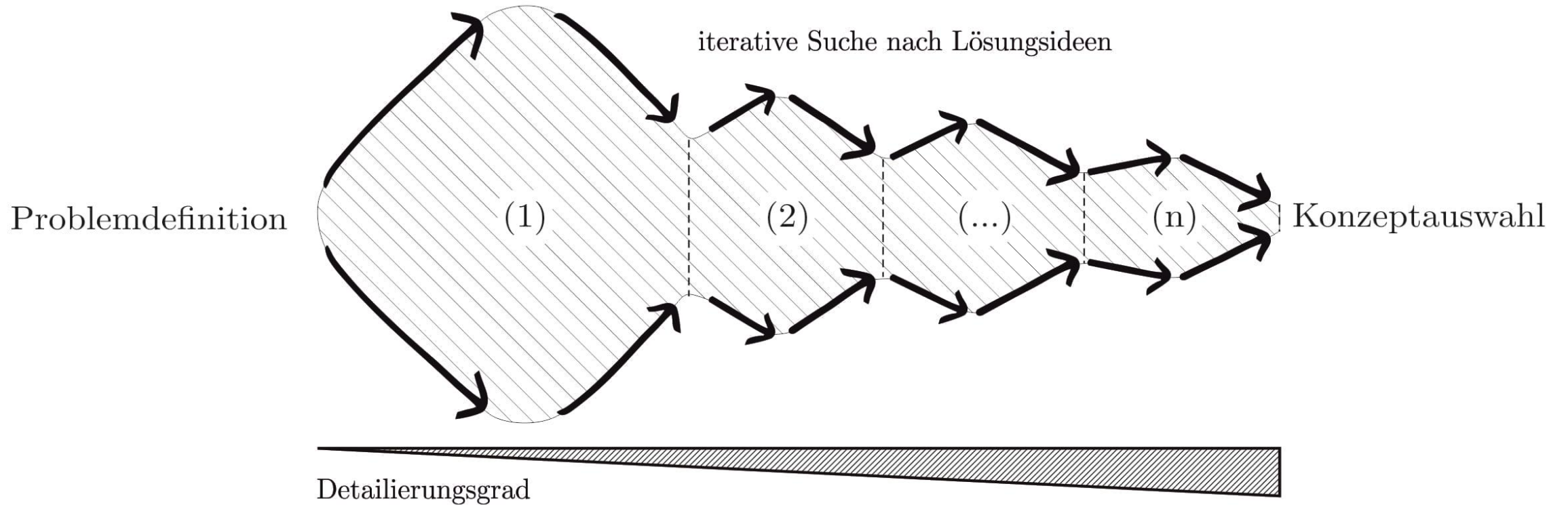
angelehnt an Pugh (1991); IDEO (2012)





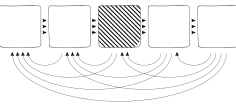
Konzeptentwurf von Lösungsalternativen

Methode der kontrollierten Konvergenz von Lösungskonzepten



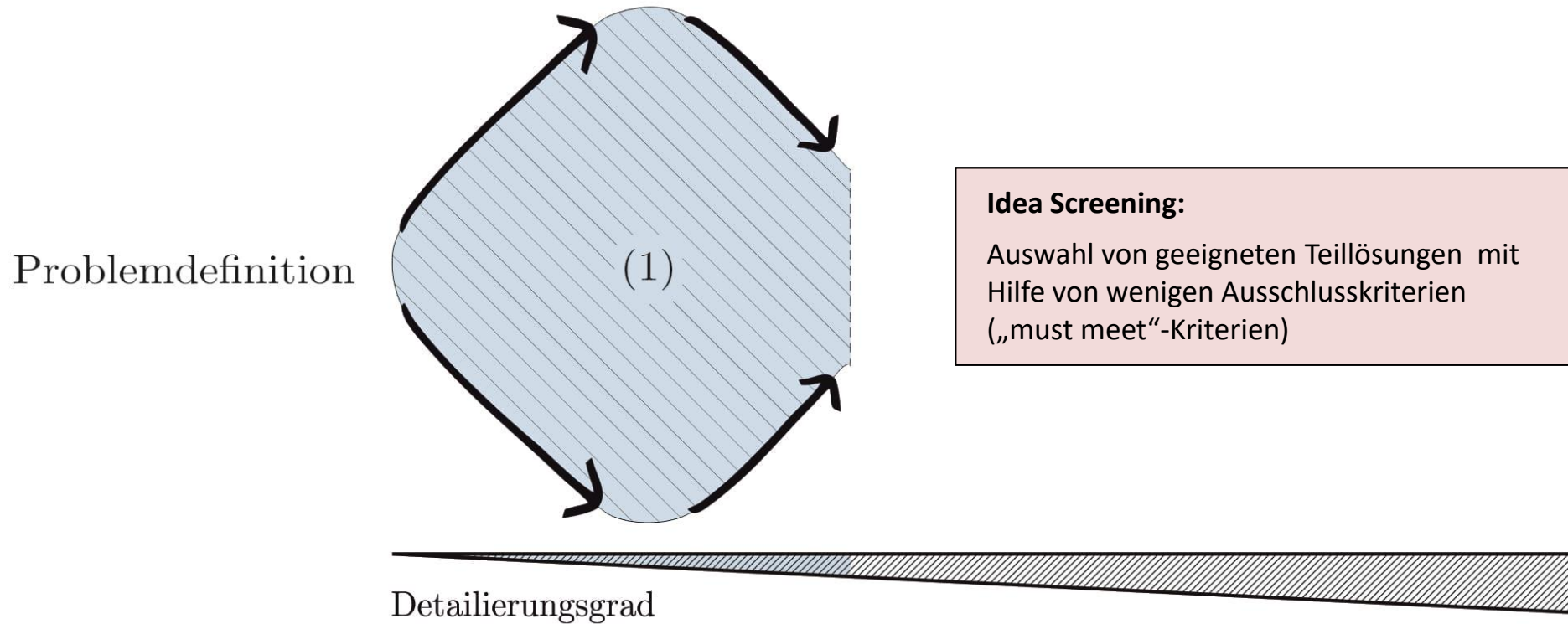
angelehnt an Pugh (1991); IDEO (2012)





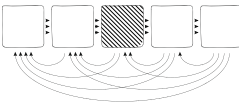
Konzeptentwurf von Lösungsalternativen

Methode der kontrollierten Konvergenz von Lösungskonzepten



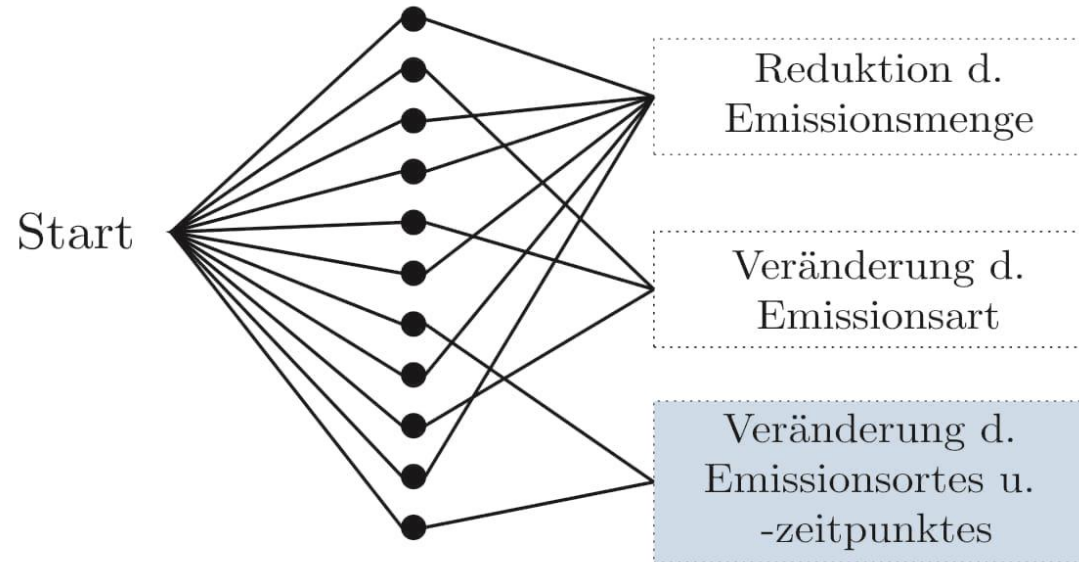
angelehnt an Pugh (1991); IDEO (2012)





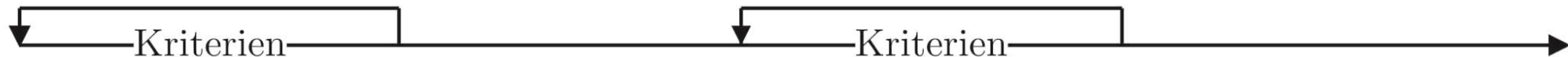
Konzeptentwurf von Lösungsalternativen

Methode der kontrollierten Konvergenz von Lösungskonzepten



Bewertungskriterien:

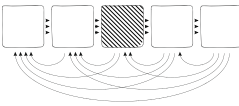
- Einsparpotenzial der Klimawirkung
- Zeitraum der Einführbarkeit



Mitigations-
konzept

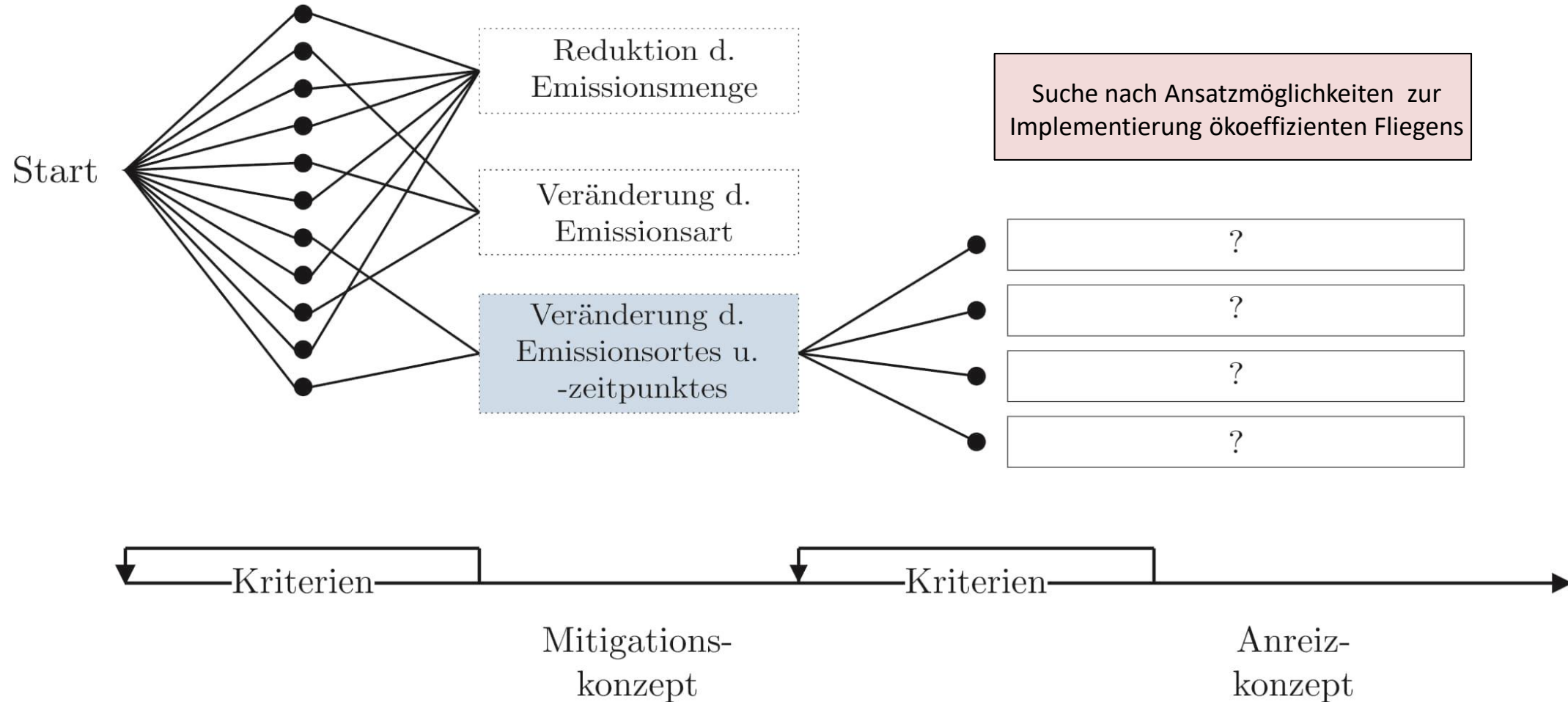
Anreiz-
konzept

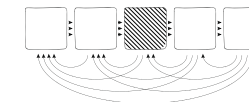




Konzeptentwurf von Lösungsalternativen

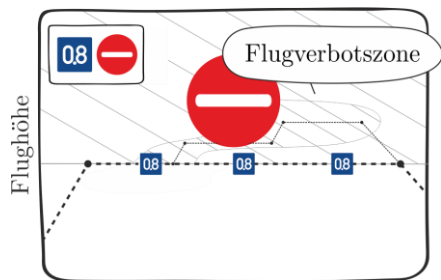
Methode der kontrollierten Konvergenz von Lösungskonzepten





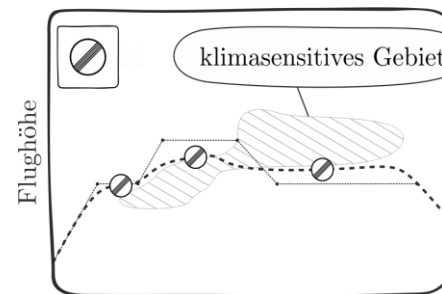
Konzeptentwurf von Lösungsalternativen

Ansatzmöglichkeiten zur Implementierung ökoeffizienten Fliegens

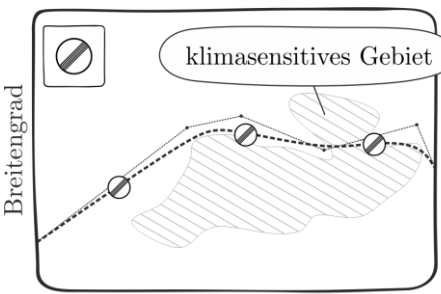


Distanz

**Zusätzliche Regulierung
der Flugführung**



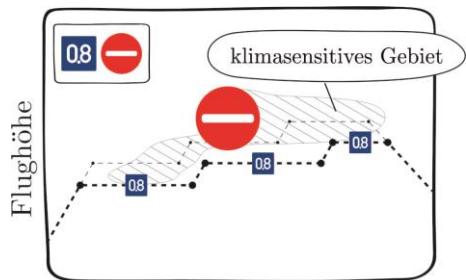
Distanz



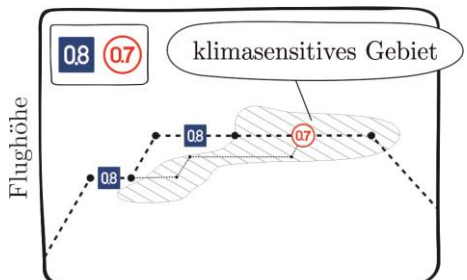
Längengrad

**denkbare
regulatorische
Ansätze**

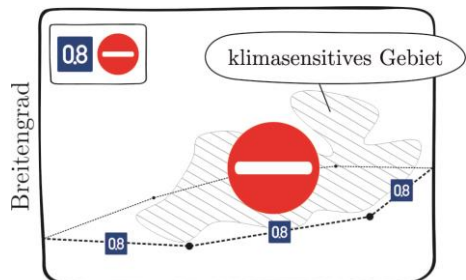
**Deregulierung der
Flugführung**



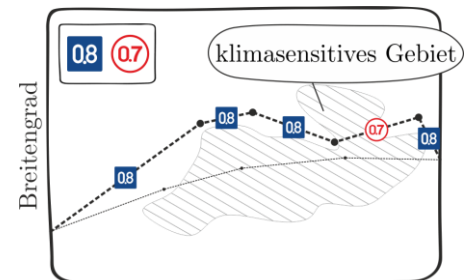
Distanz



Distanz

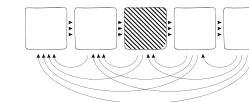


Längengrad



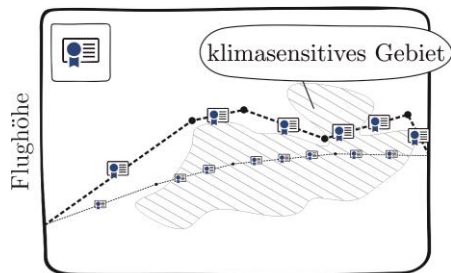
Längengrad



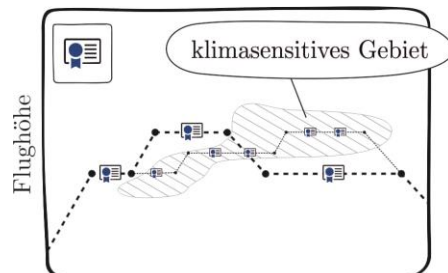


Konzeptentwurf von Lösungsalternativen

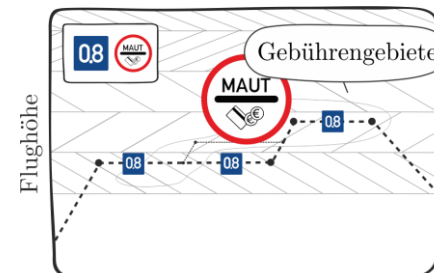
Ansatzmöglichkeiten zur Implementierung ökoeffizienten Fliegens



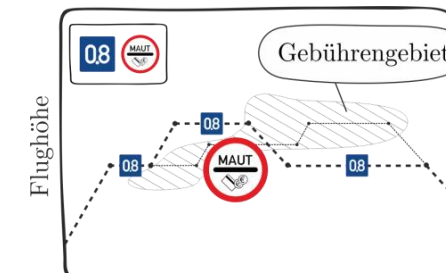
Längengrad



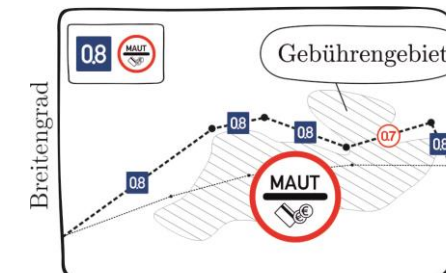
Distanz



Distanz



Distanz

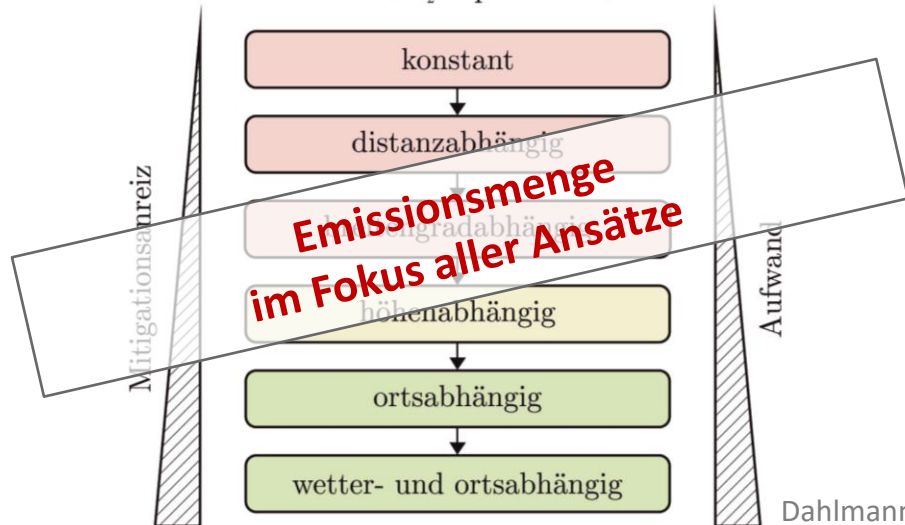


Längengrad

**denkbare
preisbasierte
Ansätze**

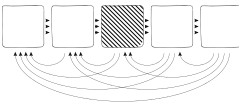
**Einführung von Gebühren,
Steuern und Zertifikaten**

Idee: Einbindung von Nicht-CO₂-Effekten mithilfe von CO₂-Äquivalenzfaktoren



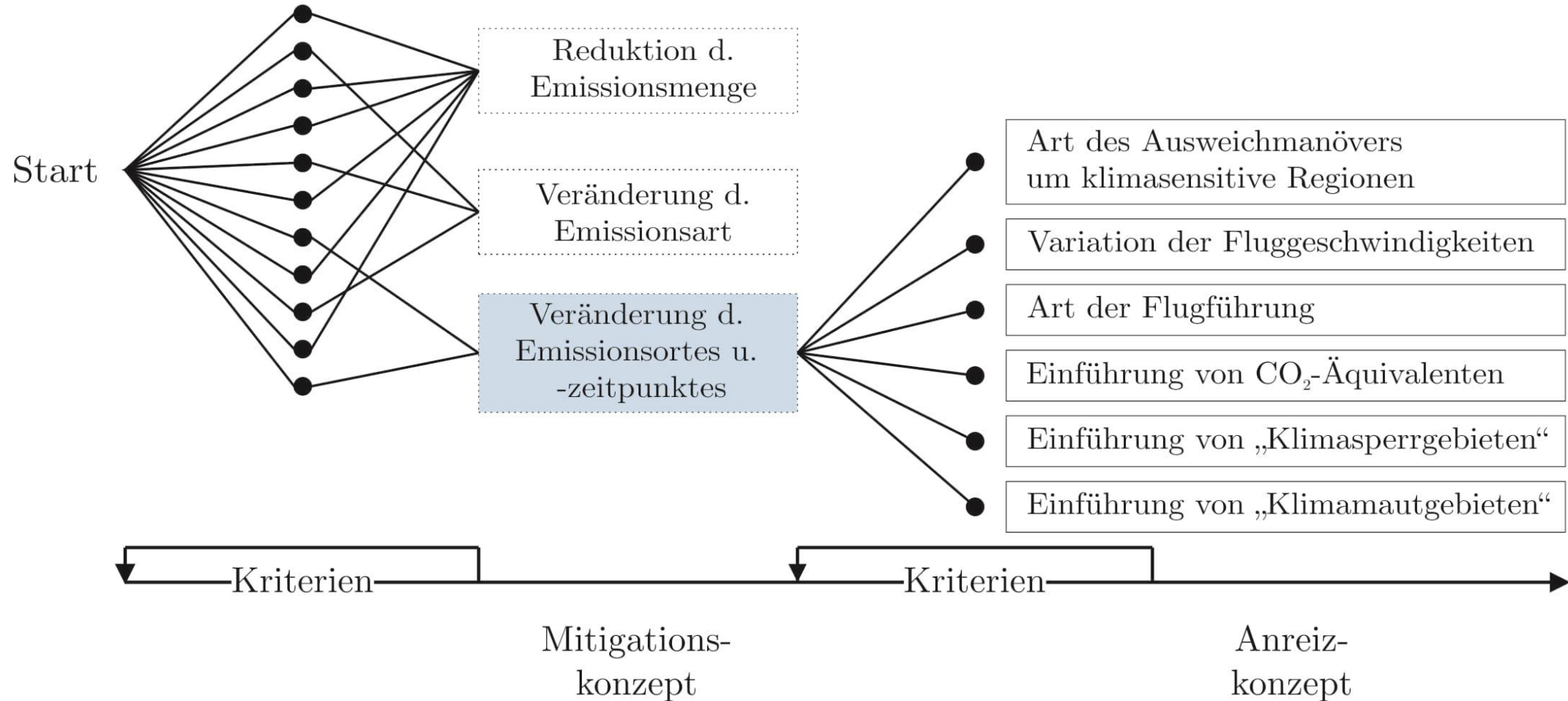
Dahlmann et al. (2018)

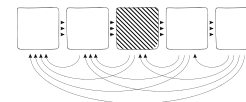




Konzeptentwurf von Lösungsalternativen

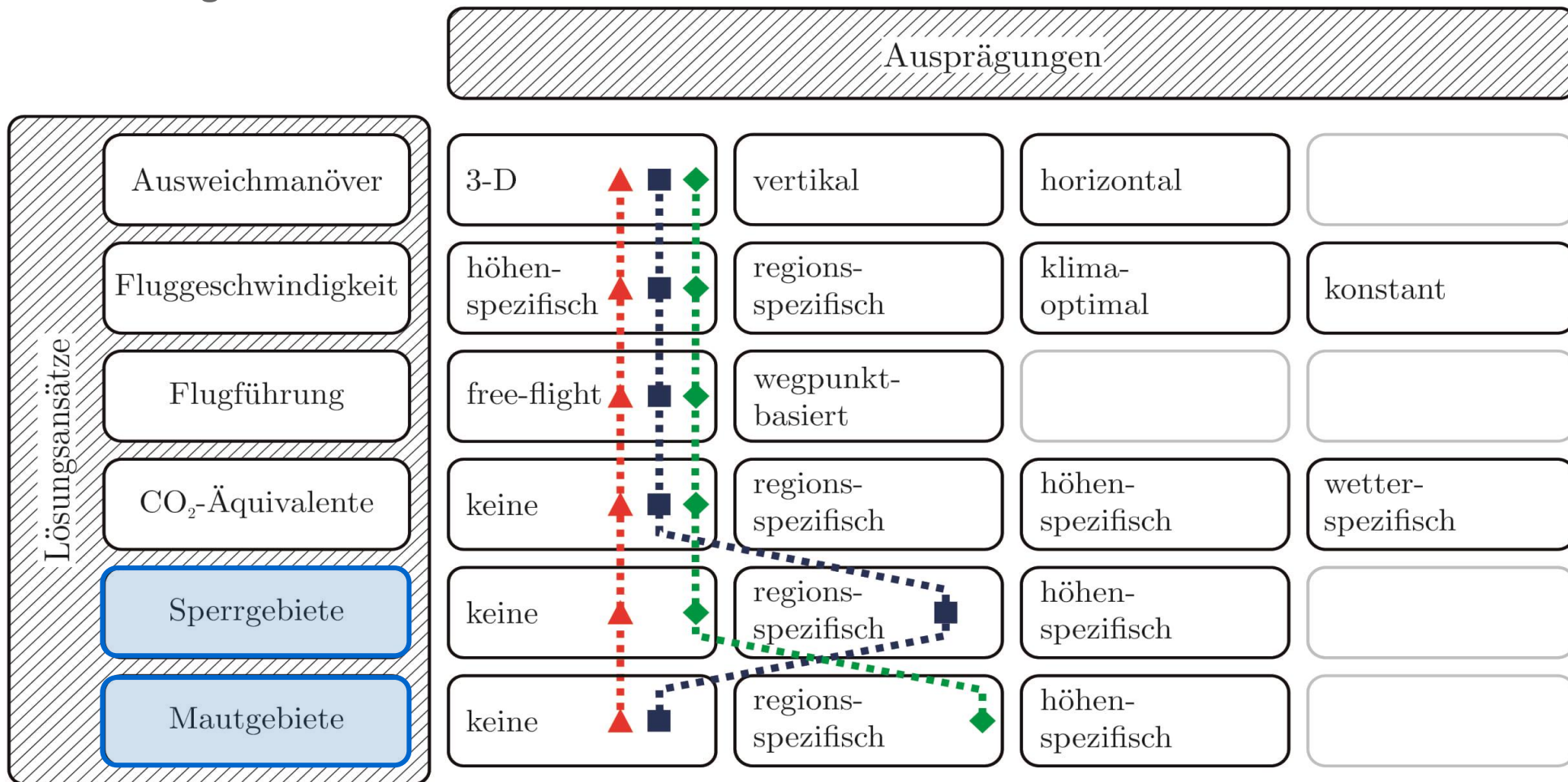
Ansatzmöglichkeiten zur Implementierung ökoeffizienten Fliegens





Konzeptentwurf von Lösungsalternativen

Synthese von Teillösungsansätzen

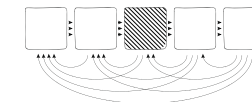


▲ klimaoptimale Flugführung (Referenz)

■ „Klimasperrgebiete“

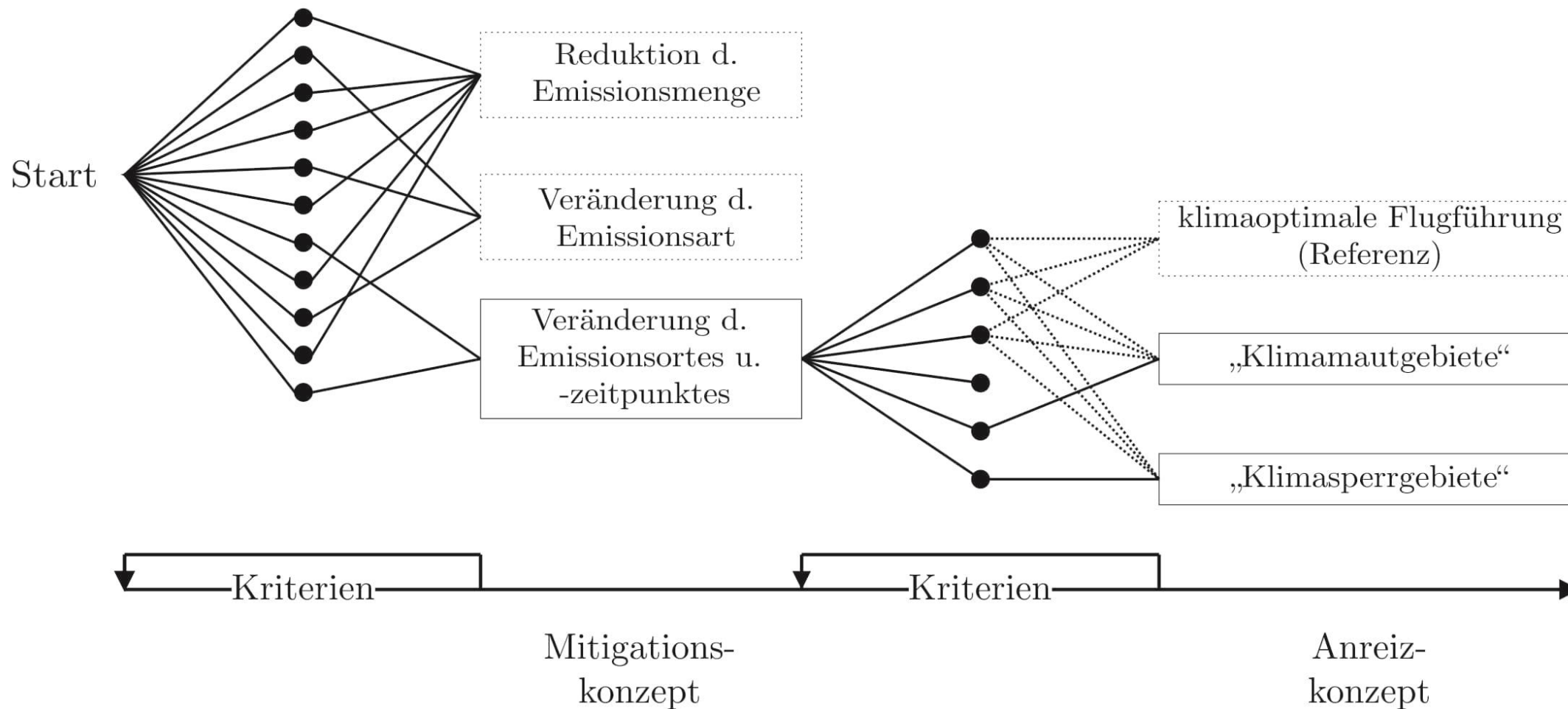
◆ „Klimamautgebiete“

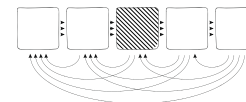




Konzeptentwurf von Lösungsalternativen

Ansatzmöglichkeiten zur Implementierung ökoeffizienten Fliegens

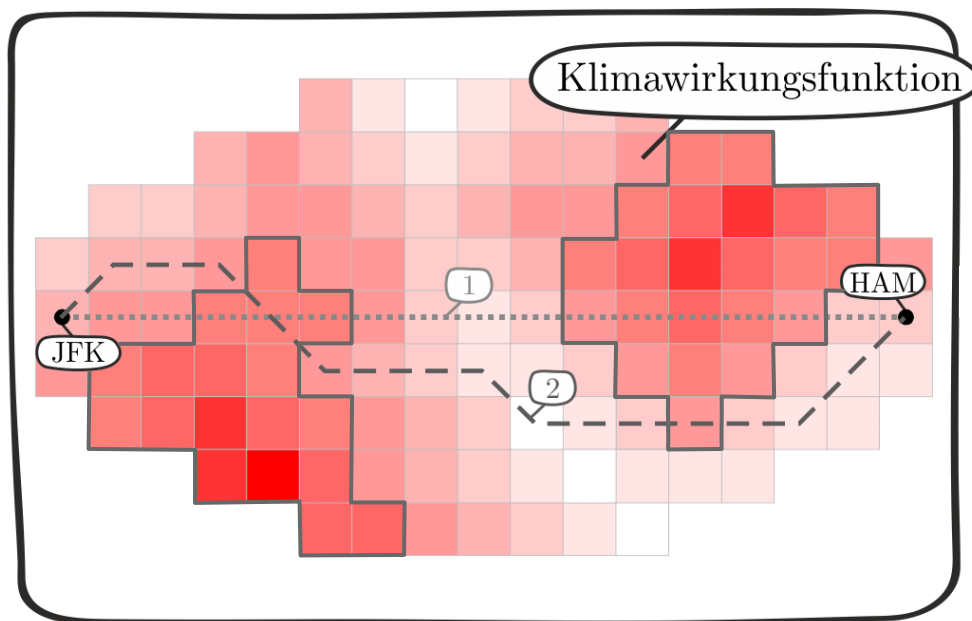




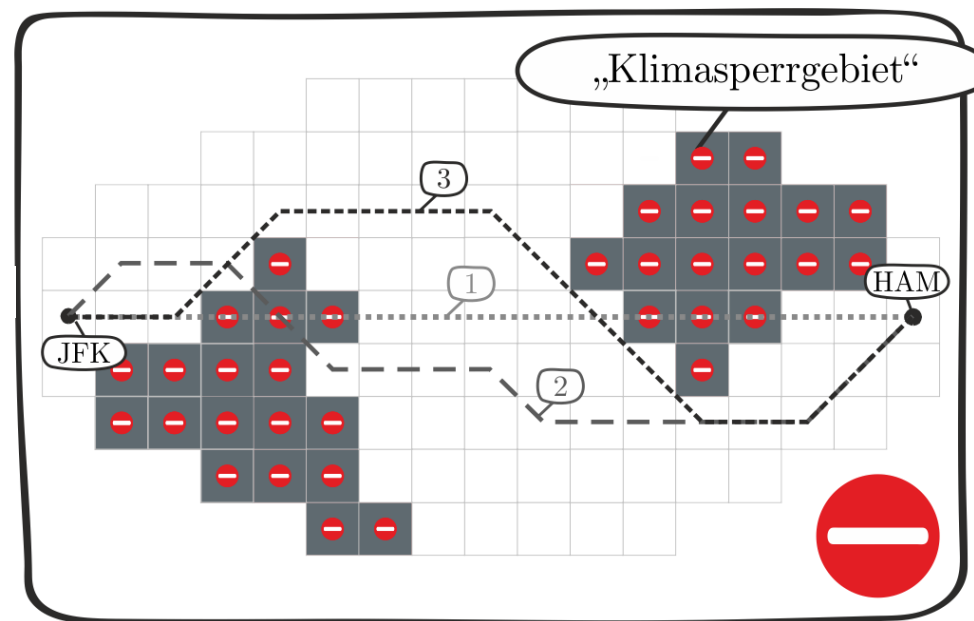
Konzept der Klimasperrgebiete

Restriktiver Lösungsansatz

Fokus auf besonders klimasensitive Regionen



Erzeuge eine **Notwendigkeit** zur Mitigation

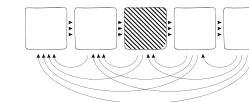


- (1) Zeitoptimale Flugtrajektorie
- (2) Klimaoptimale Flugtrajektorie
- (3) Kostenoptimale Flugtrajektorie

$$CRA(\mathbf{z}, t) = \begin{cases} 1, & \text{falls } CCF(\mathbf{z}, t) \geq c_{thr} \\ 0, & \text{falls } CCF(\mathbf{z}, t) < c_{thr} \end{cases}$$

CRA := Climate-Restricted Airspace Area
 CCF := Climate change function
 c_{thr} := Threshold value

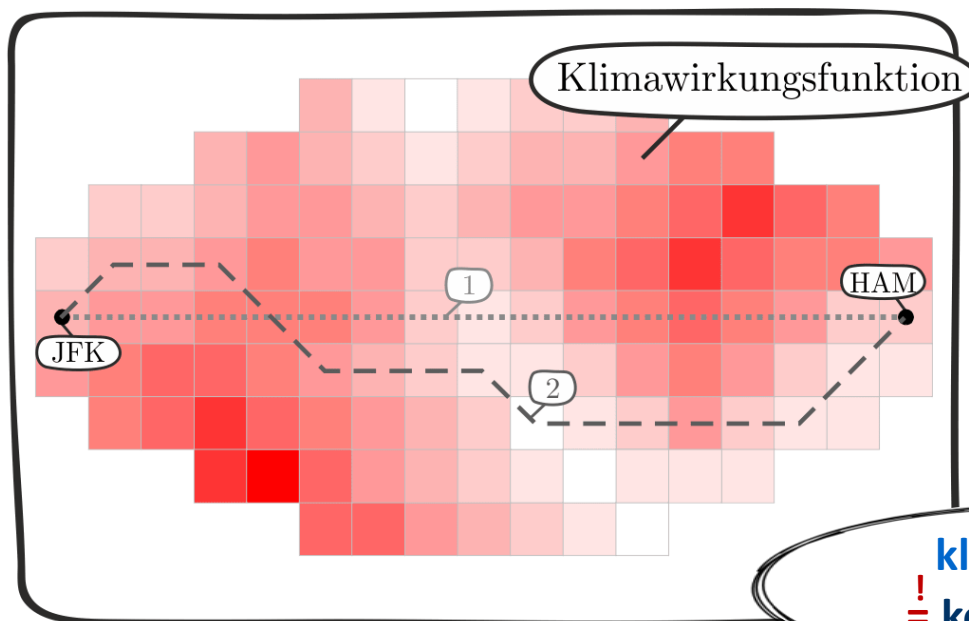




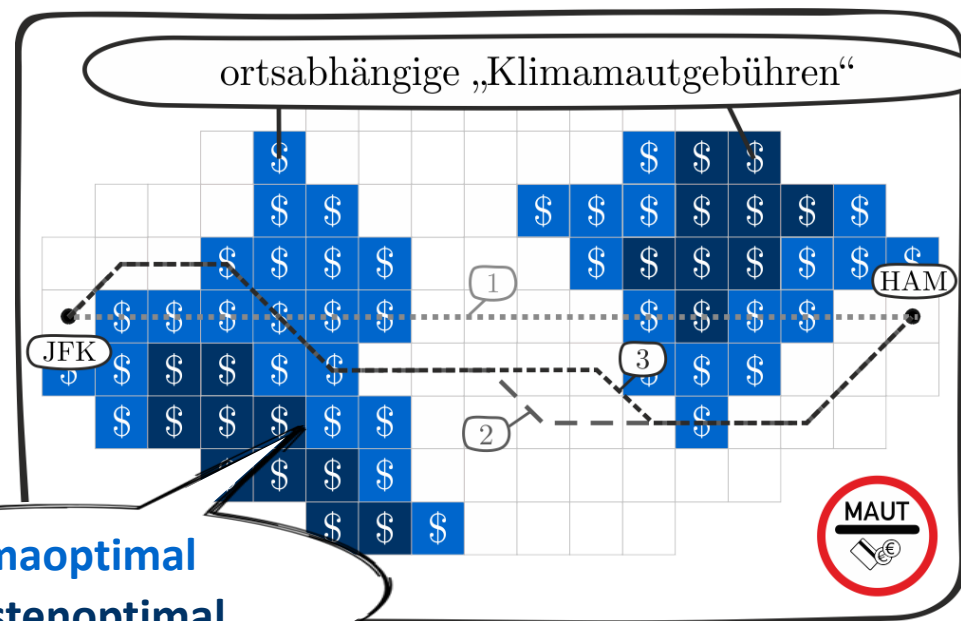
Concept of Climate-Charged Airspace Areas (CCA)

Preisbasierter Lösungsansatz

Fokus auf besonders klimasensitive Regionen



Erzeuge einen **finanziellen Anreiz** zur Mitigation



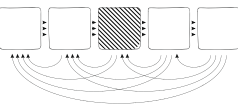
klimaaoptimal
! kostenoptimal

- (1) Zeitoptimale Flugtrajektorie
- (2) Klimaaoptimale Flugtrajektorie
- (3) Kostenoptimale Flugtrajektorie

$$CCA(\mathbf{z}, t) = \begin{cases} U_{c,j}, & \text{falls } CCF(\mathbf{z}, t) \geq c_{thr} \\ 0, & \text{falls } CCF(\mathbf{z}, t) < c_{thr} \end{cases}$$

CCA := Climate-Charged Airspace Area
CCF := Climate change function
 c_{thr} := Threshold value
 $U_{c,j}$:= Climate-unit charge





Konzept der Klimamautgebiete

Berechnung der Klimamautgebührenhöhe

$$(1) \quad COC = C_{Fuel} + C_{Crew} + C_{Maintenance} + C_{Landing} + C_{Navigation} + C_{Climate}$$

$$(2) \quad C_{Climate} = U_{cj} \cdot \left(\frac{MTOW}{k_1} \right)^{k_2} \cdot d_j \cdot I_{AC}$$

Gebühr in Abhängigkeit des maximalen Abfluggewichtes

Anreizfaktor für umweltfreundliche Technologien

Fester Gebührensatz pro Kilometer [$\$/km$]

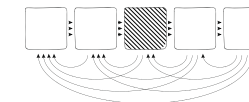
Zurückgelegte Distanz im Klimamautgebiet

mit $I_{AC} = \begin{cases} 1 & \text{für aktuelle Technologiestandards} \\ \vdots & \text{für klimafreundlichere Technologien} \\ 0 & \text{für emissionslose Luftfahrzeuge} \end{cases}$

In Analogie zu en-route Flugführungsgebühren (C_{ei}):

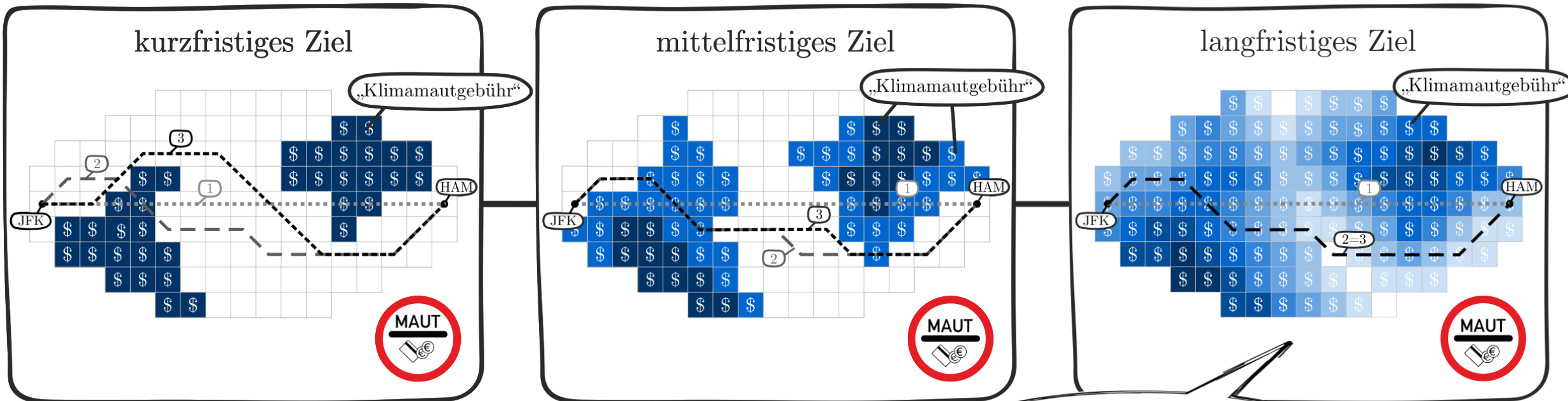
$$C_{ei} = U_{ei} \cdot \left(\frac{MTOW}{k_1} \right)^{k_2} \cdot d_i$$





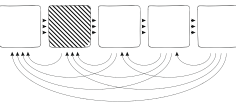
Konzept der Klimamautgebiete

Preisbasierter Lösungsansatz



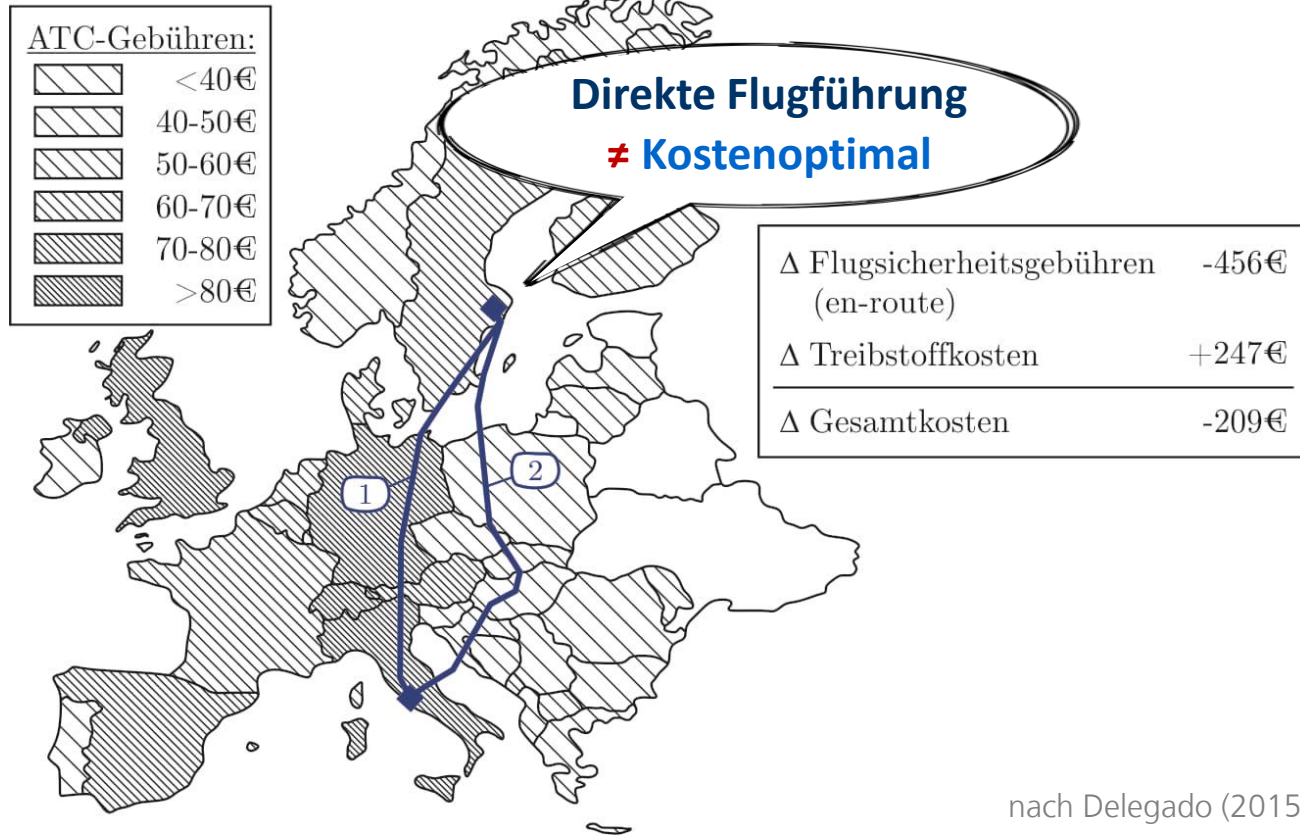
klimaaoptimal
≠ kostenoptimal





Praktikabilität eines preisbasierten Ansatzes in der Luftfahrt

Einfluss der Flugroutenführung auf die Gesamtbetriebskosten



nach Delegado (2015)

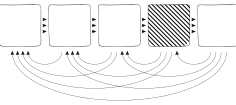
“If an airline chooses to fly a longer route around an expensive airspace, it’s relatively cheap these days, in terms of additional fuel burn, to do this.”



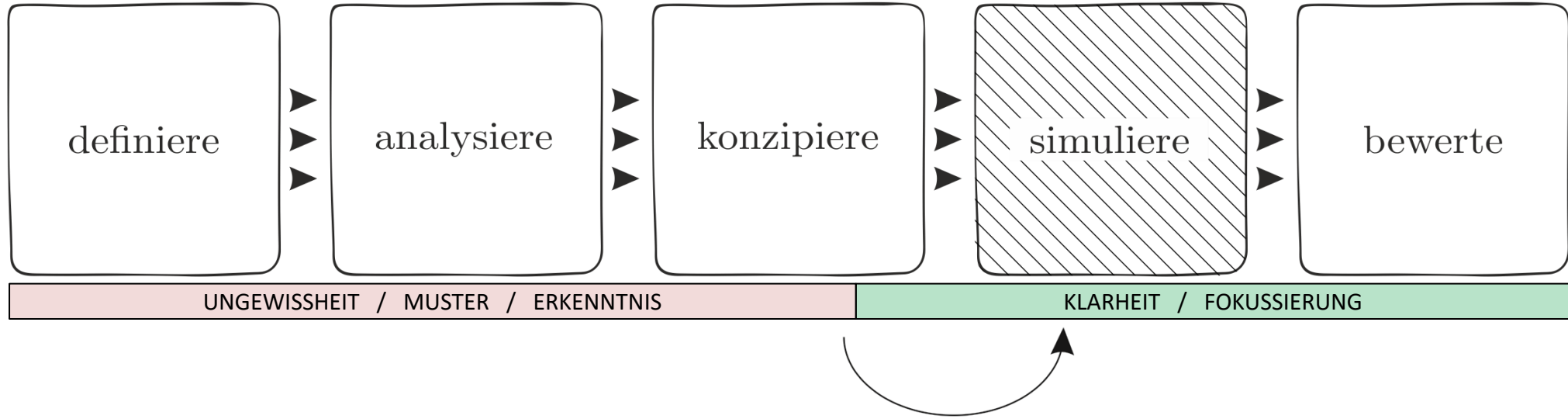
Flemming Nystrup (2016)
Performance Manager at MUAC
Eurocontrol

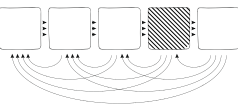
Eurocontrol (2016)





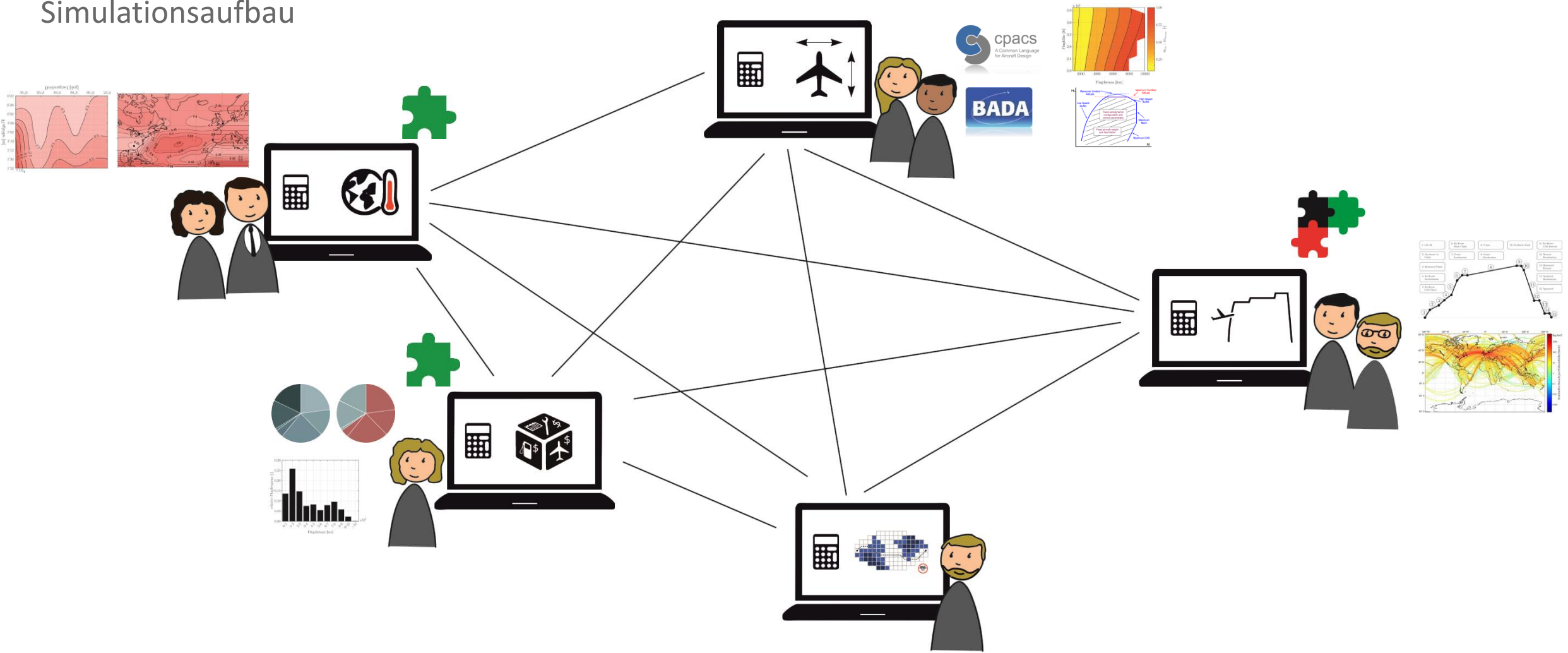
Modellbildung und Simulation

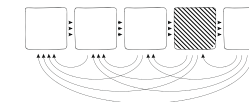




Modellbildung und Simulation

Simulationsaufbau





Modellbildung und Simulation

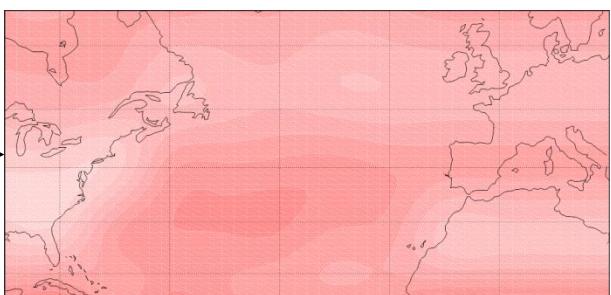
Simulationsaufbau

> Klimaoptimale Flugtrajektorien > Referenz

> 1. Zielfunktion: Minimiere d. Betriebskosten



> 2. Zielfunktion: Minimiere d. Klimawirkung



> Monetäre Gewichtung: 100-0 %
 > **Klimatologische Gewichtung:** **0-100 %**

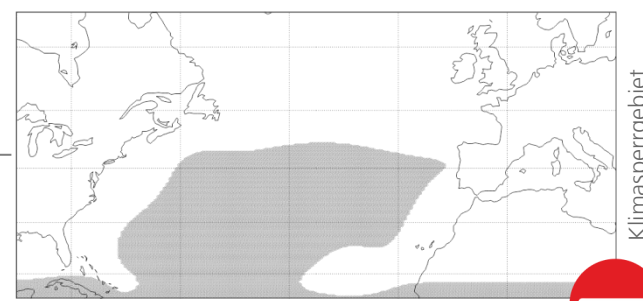
Multikriterielle Optimierung

> Konzept der Klimasperrgebiete

> 1. Zielfunktion: Minimiere d. Betriebskosten



> RB: Vermeide Klimasperrgebiete



> Monetäre Gewichtung: 100 %
 > **Gesperrter Luftraum:** **0-100 %**

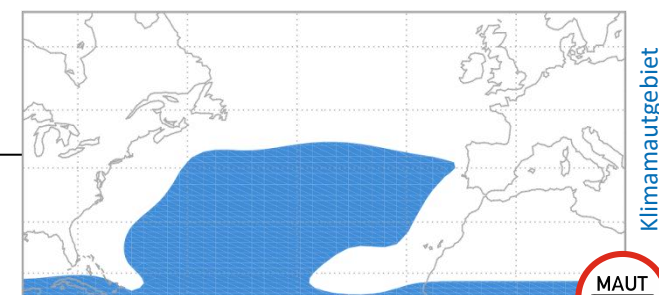
COC- Minimierung mit Randbedingung

> Konzept der Klimamautgebiete

> 1. Zielfunktion: Minimiere d. Betriebskosten



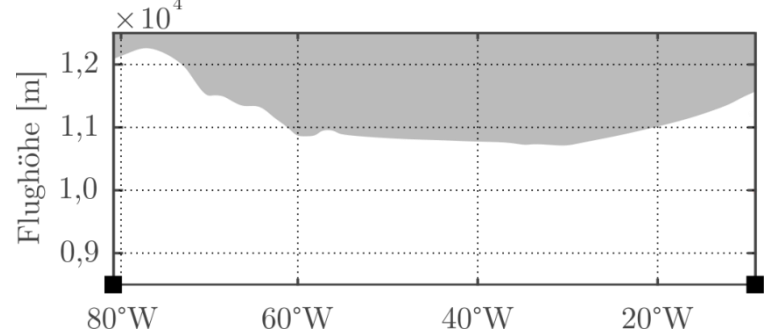
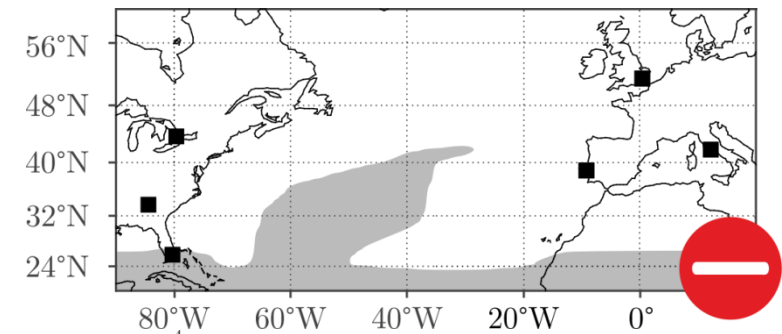
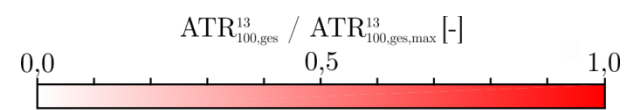
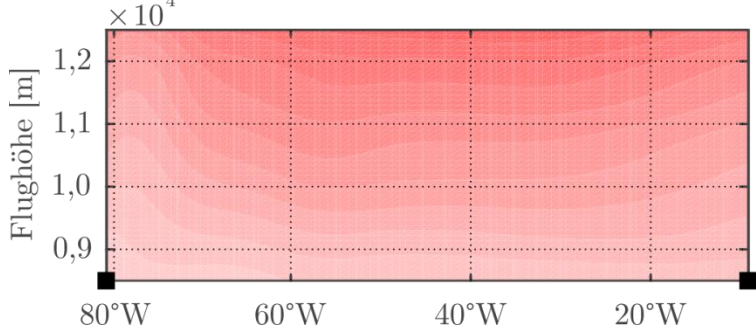
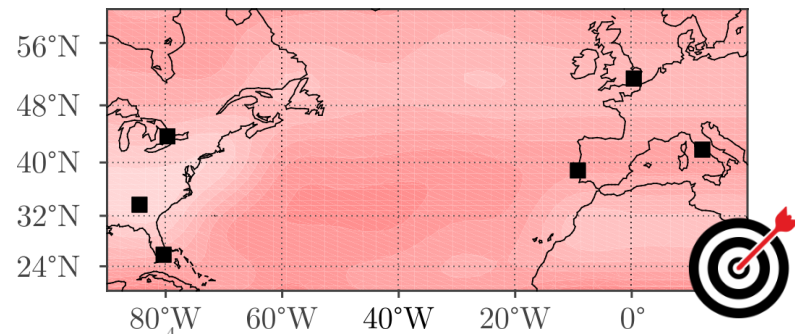
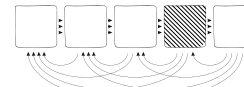
> RB: Zusätzliche Klimamautgebühren



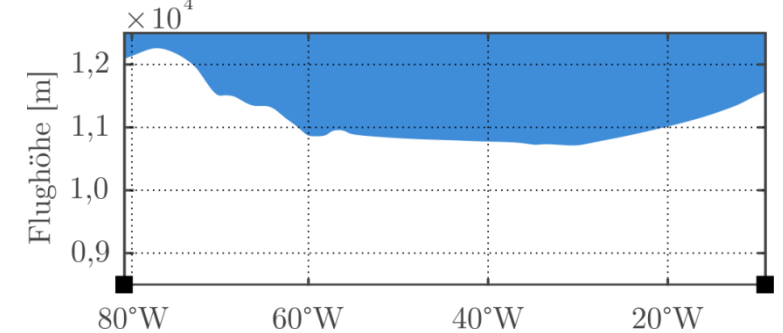
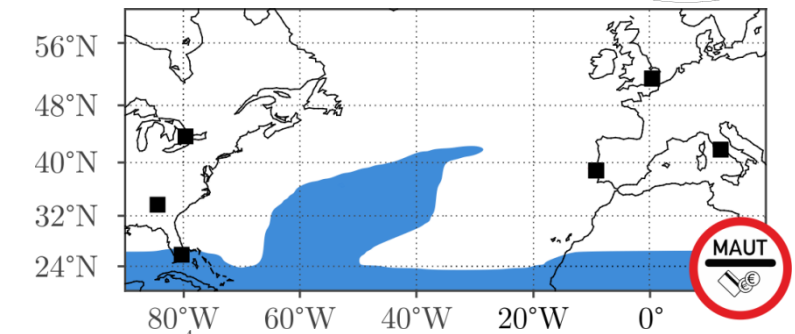
> Monetäre Gewichtung : 100 %
 > **Gebührenpflichtiger Luftraum:** **0-100 %**
 > **Klimamautgebührenhöhe:** **0-10 \$/km**

COC- Minimierung mit Randbedingung



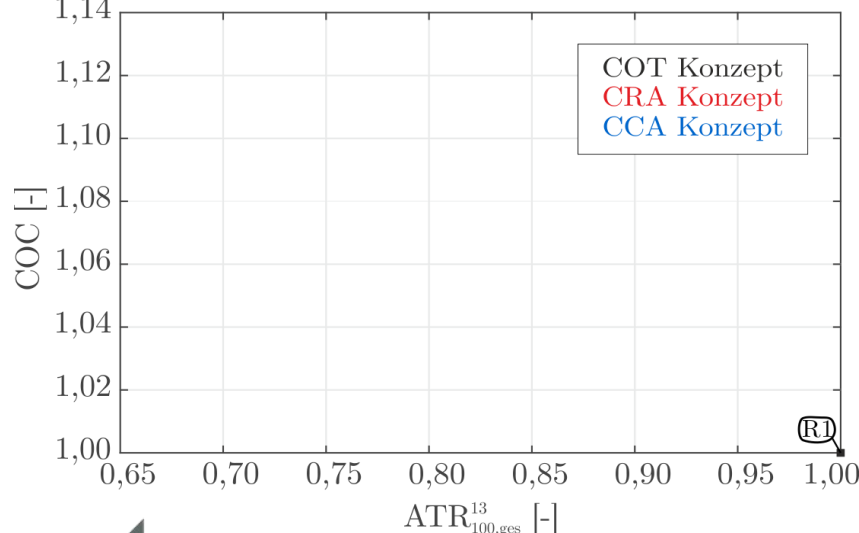
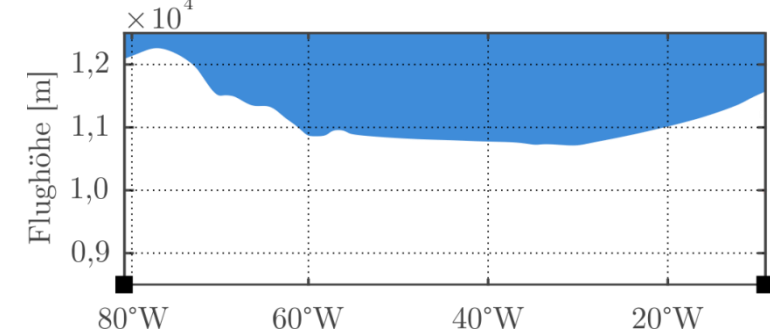
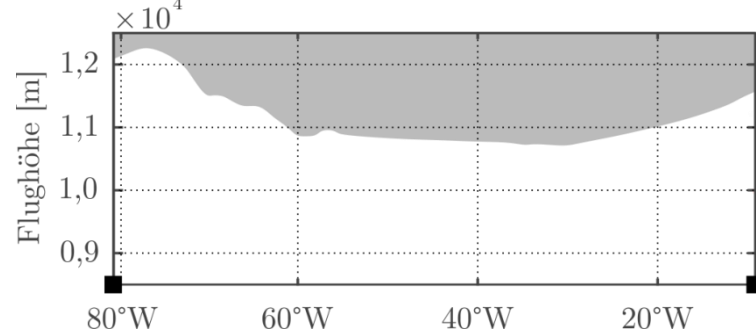
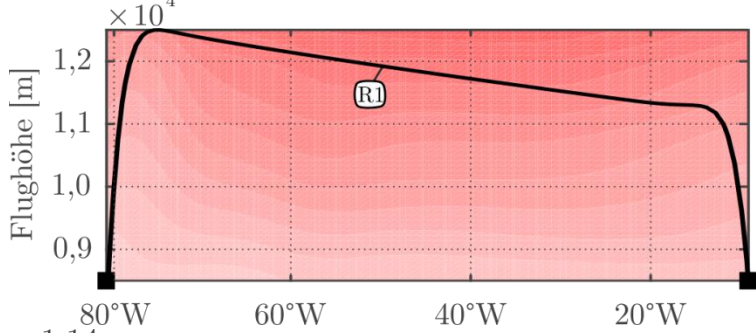
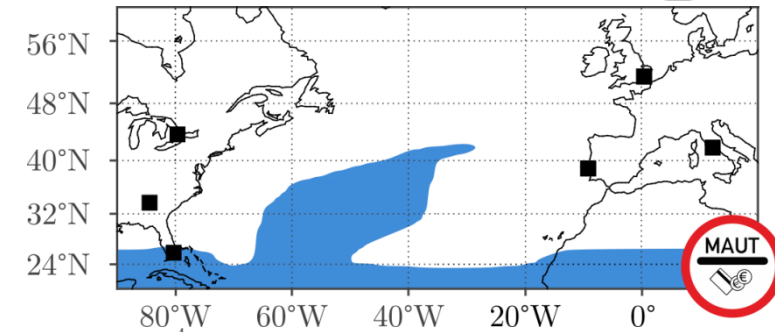
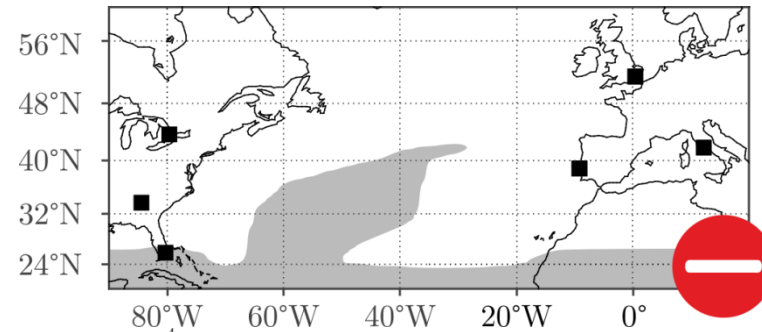
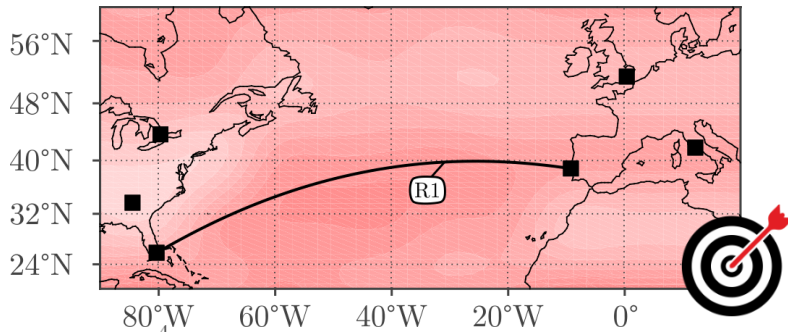
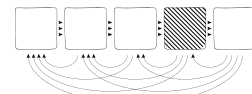


Funktionalitätsanalyse auf Einzelroute	
Anzahl Routen	1
Schwellenwert	konstant
Gebührenhöhe	konstant
Klimawirkungsfunktionen	Jahresmittel



← Flugrichtung



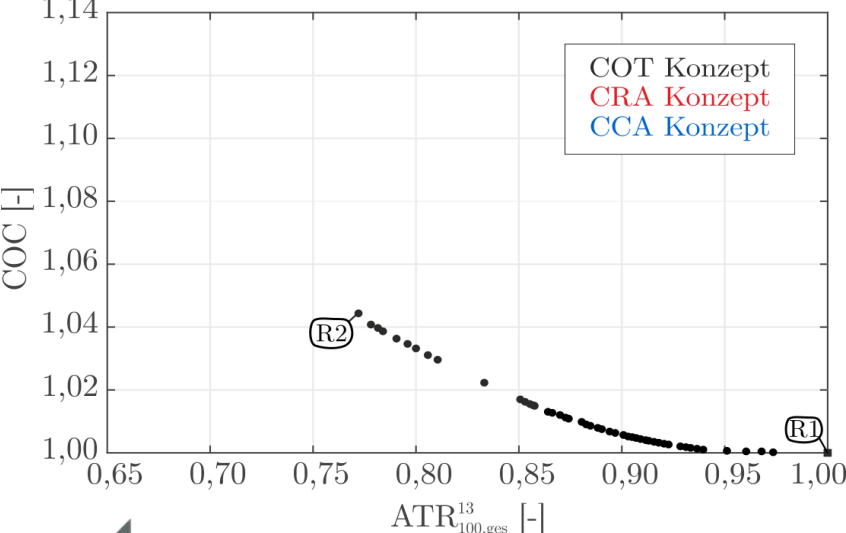
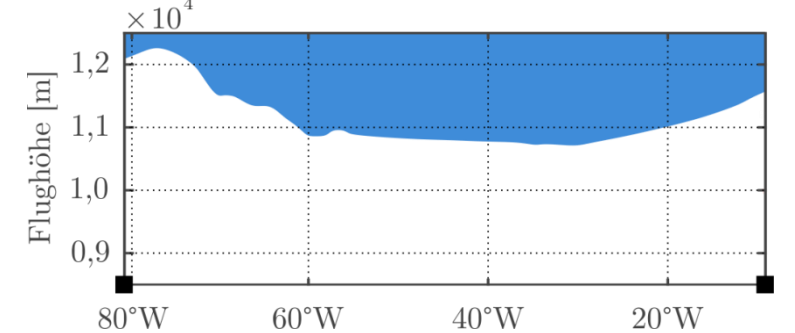
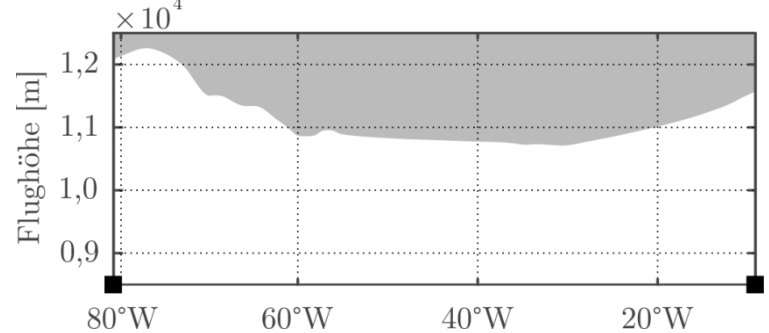
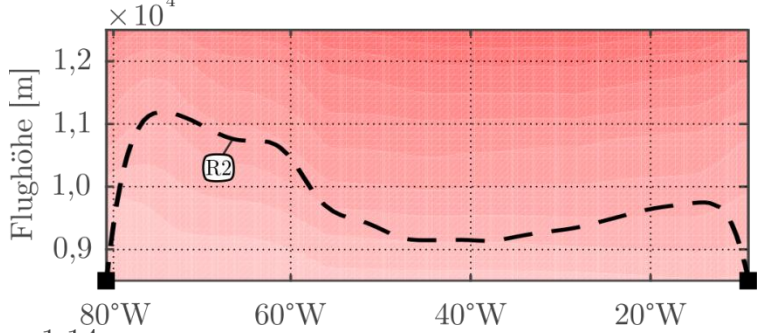
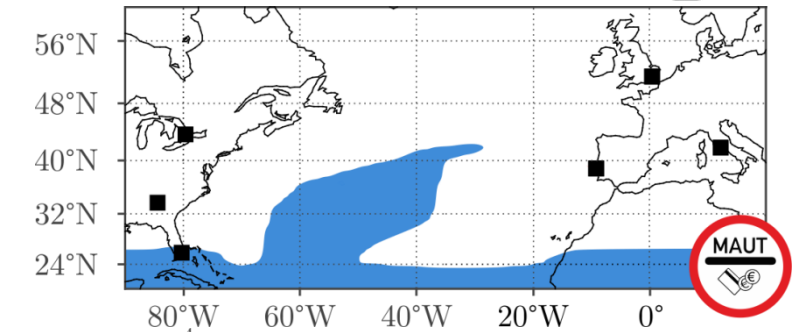
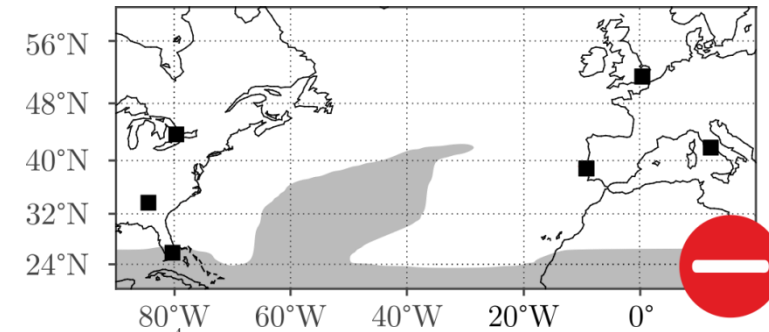
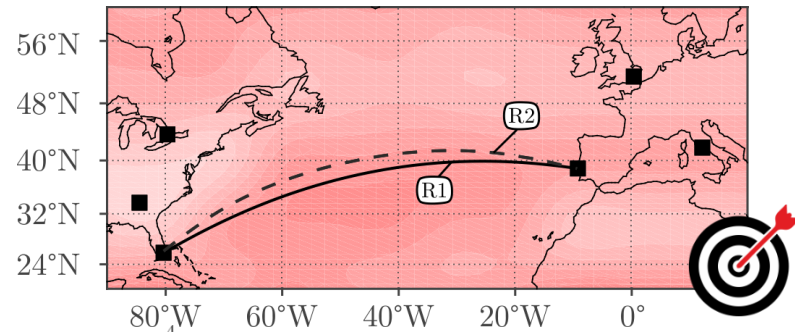
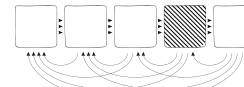


Gewichtungsfaktor Kosten	100.0	[%]
Gewichtungsfaktor Klima	0.0	[%]
Gebührenpflichtiger Luftraum	0.0	[%]
Klimamautgebührenhöhe	0.000	[\$/km]
Betriebskosten (COC)	1.000	[-]
Klimawirkung (ATR)	1.000	[-]
Treibstoffverbrauch	1.000	[-]
Flugzeit	1.000	[-]

variabel

← Flugrichtung



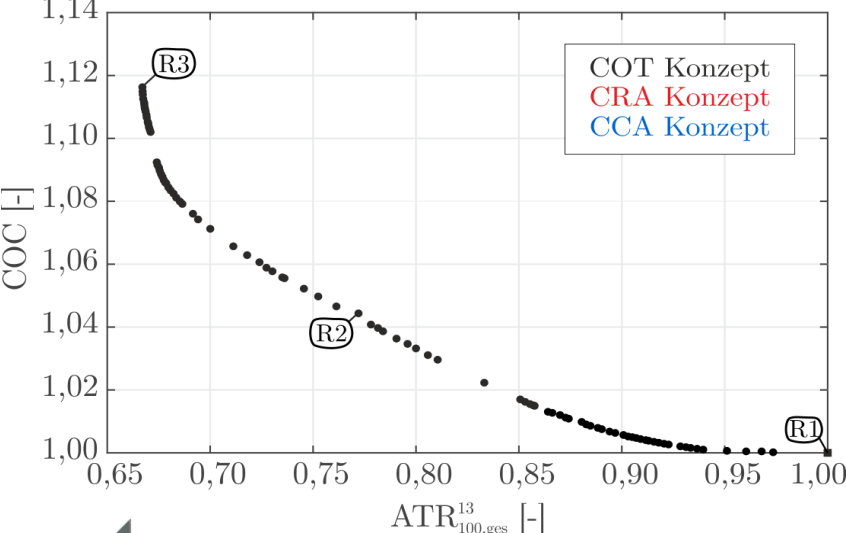
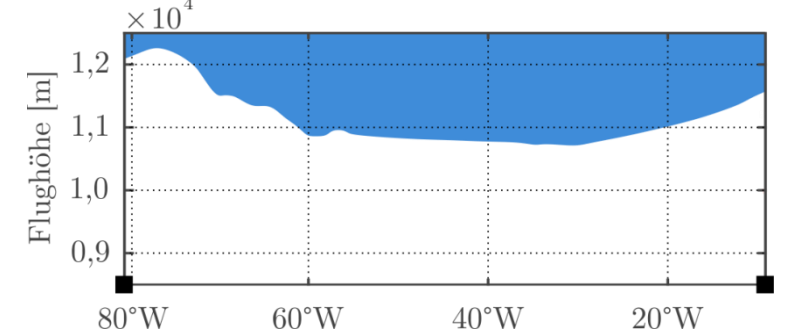
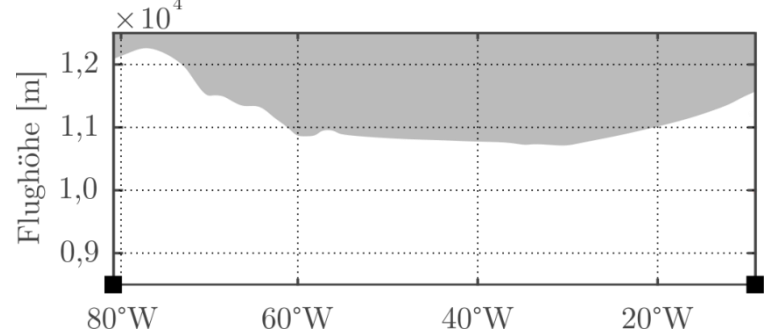
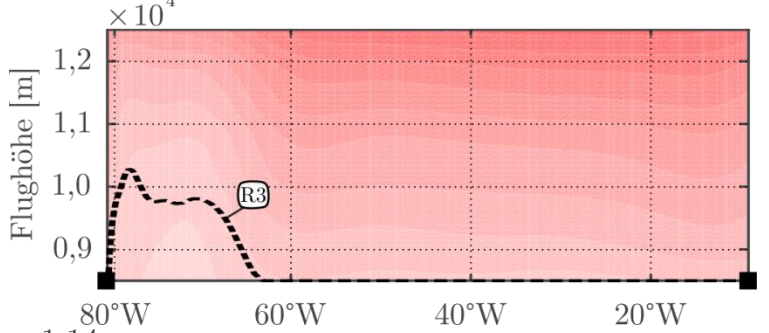
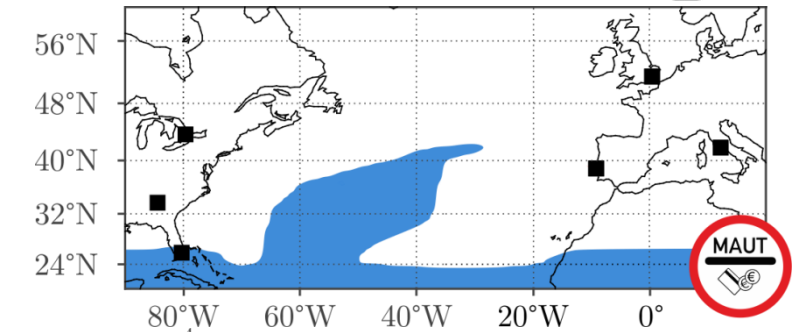
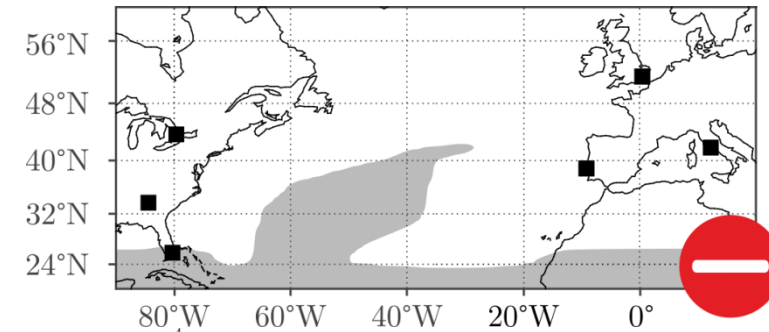
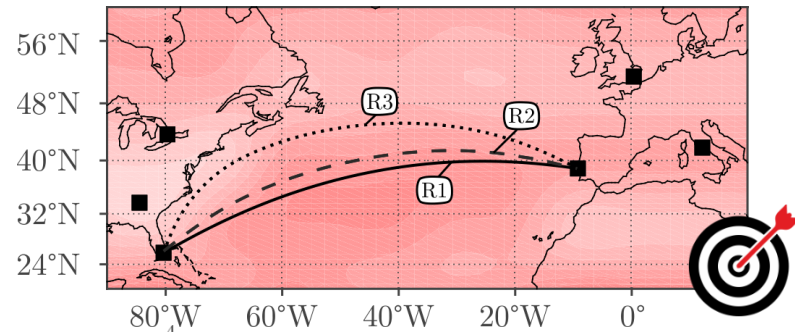
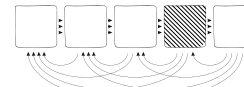


Gewichtungsfaktor Kosten	63.0	[%]
Gewichtungsfaktor Klima	37.0	[%]
Gebührenpflichtiger Luftraum	0.0	[%]
Klimamautgebührenhöhe	0.000	[\$/km]
Betriebskosten (COC)	1.043	[-]
Klimawirkung (ATR)	0.773	[-]
Treibstoffverbrauch	1.114	[-]
Flugzeit	0.986	[-]

variabel

← Flugrichtung





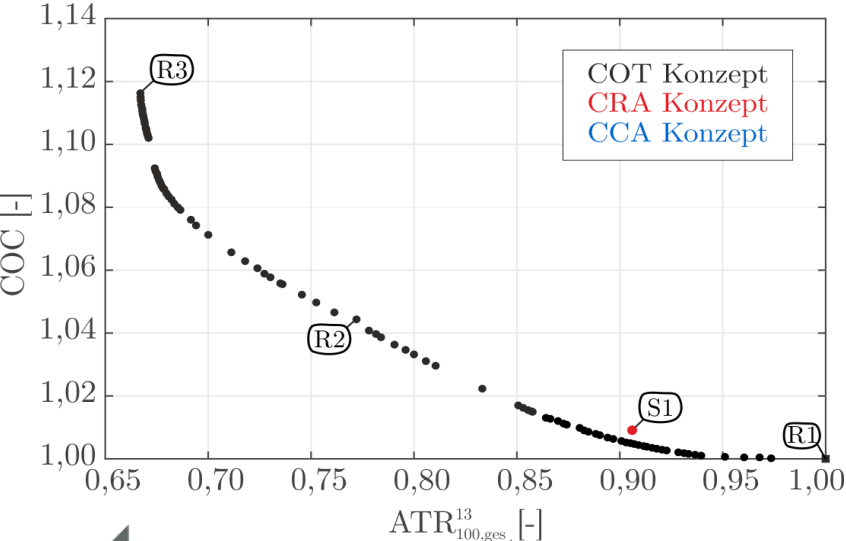
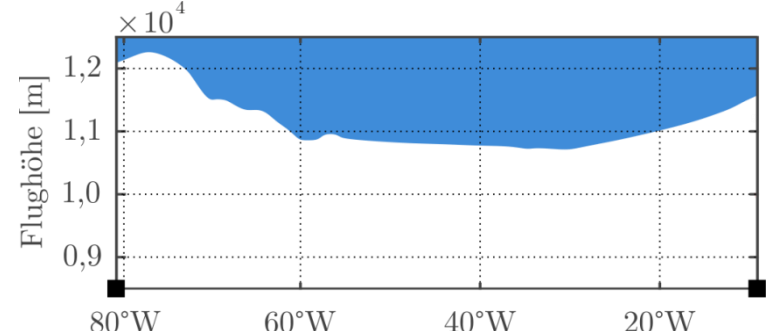
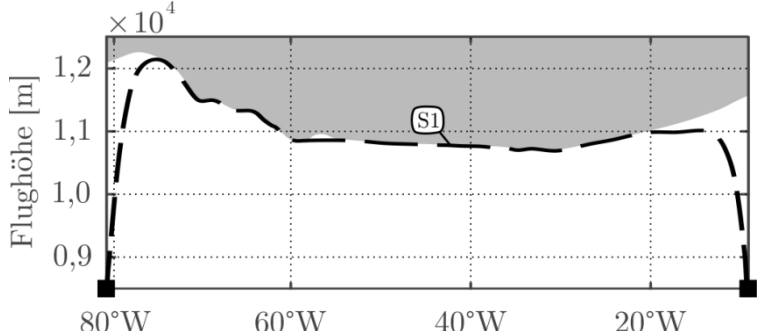
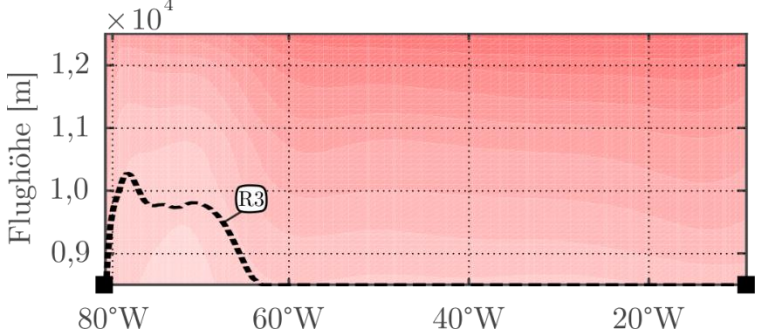
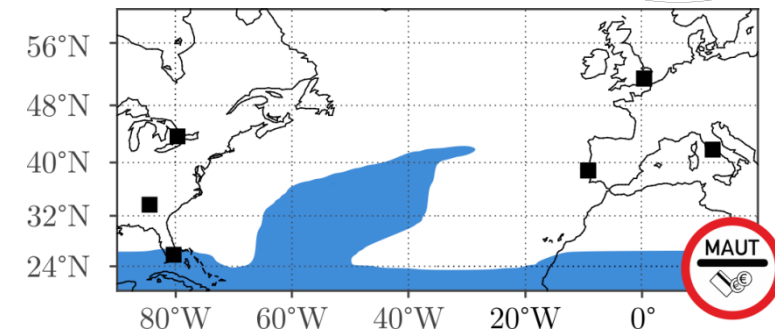
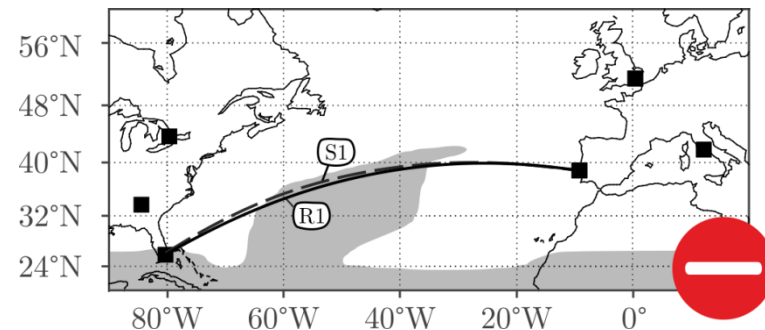
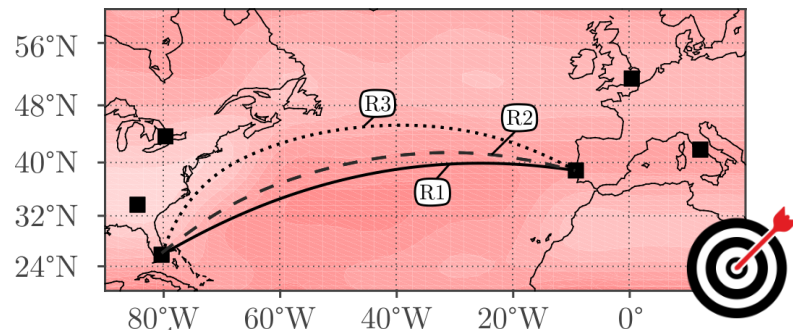
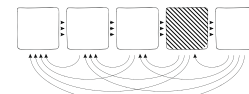
Gewichtungsfaktor Kosten	0.0	[%]
Gewichtungsfaktor Klima	100.0	[%]
Gebührenpflichtiger Luftraum	0.0	[%]
Klimamautgebührenhöhe	0.000	[\$/km]
Betriebskosten (COC)	1.115	[-]
Klimawirkung (ATR)	0.667	[-]
Treibstoffverbrauch	1.250	[-]
Flugzeit	1.010	[-]

variabel

← Flugrichtung

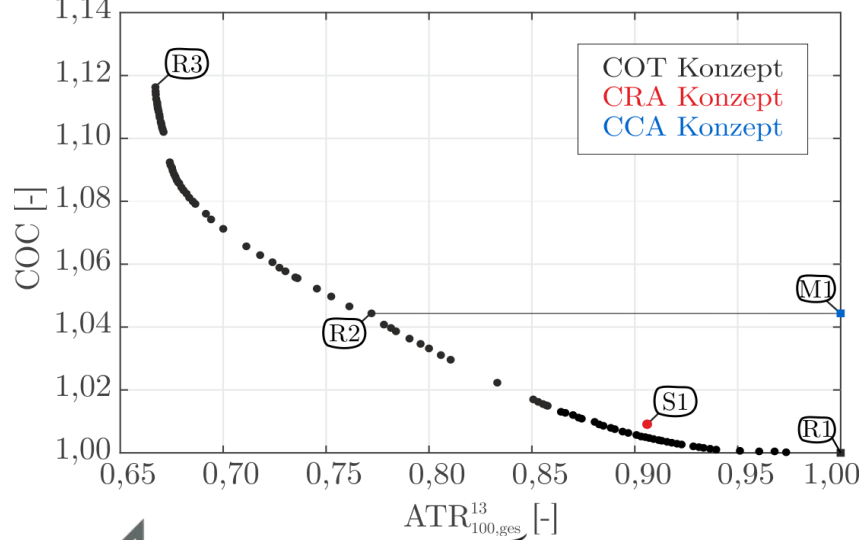
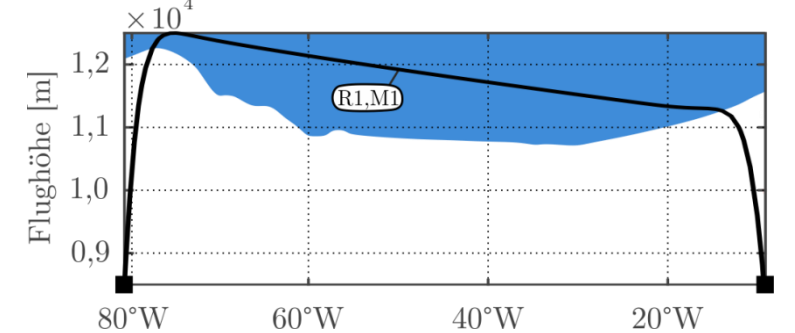
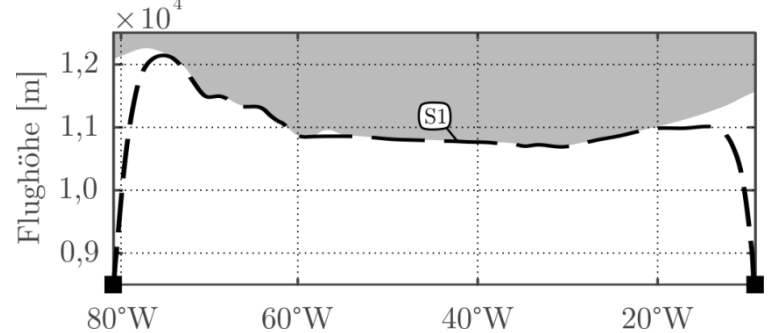
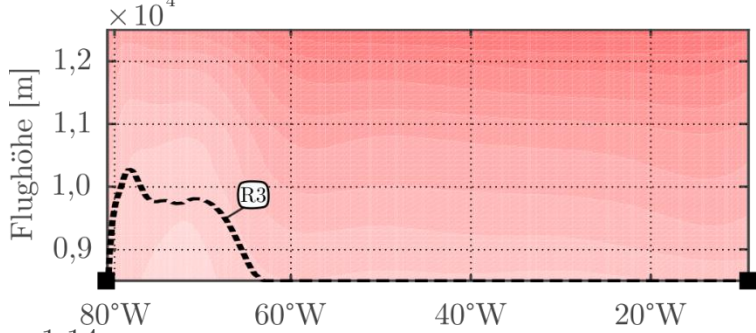
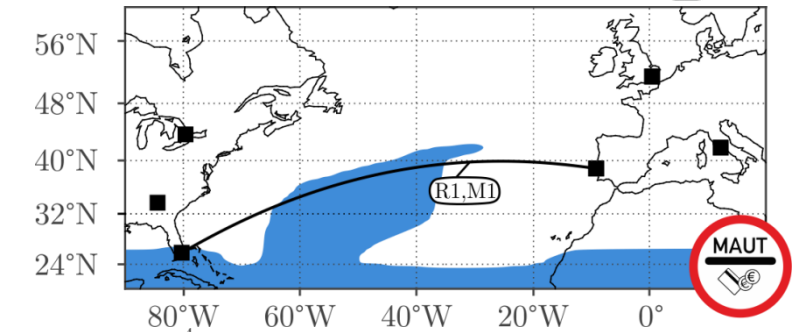
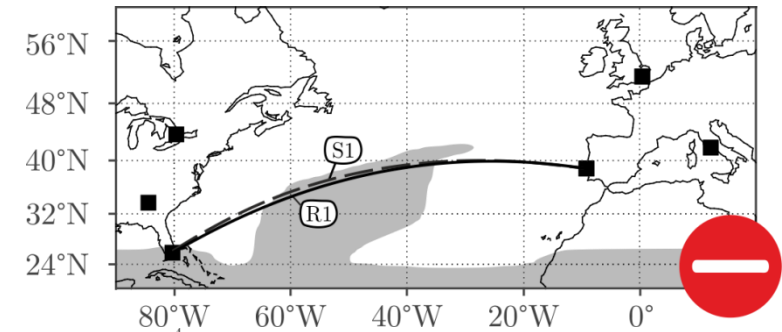
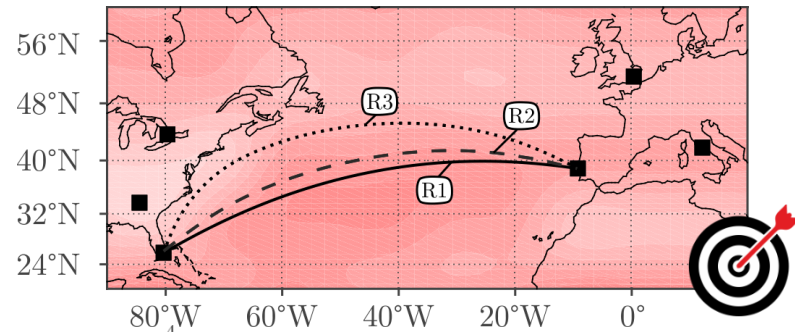
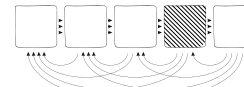
klimaaoptimal
≠ kostenoptimal





Gewichtungsfaktor Kosten	100.0	[%]
Gewichtungsfaktor Klima	0.0	[%]
Gesperter Luftraum	33.0	[%]
Klimamautgebührenhöhe	∞	[\$/km]
} konstant		
Betriebskosten (COC)	1.008	[-]
Klimawirkung (ATR)	0.906	[-]
Treibstoffverbrauch	1.021	[-]
Flugzeit	0.998	[-]

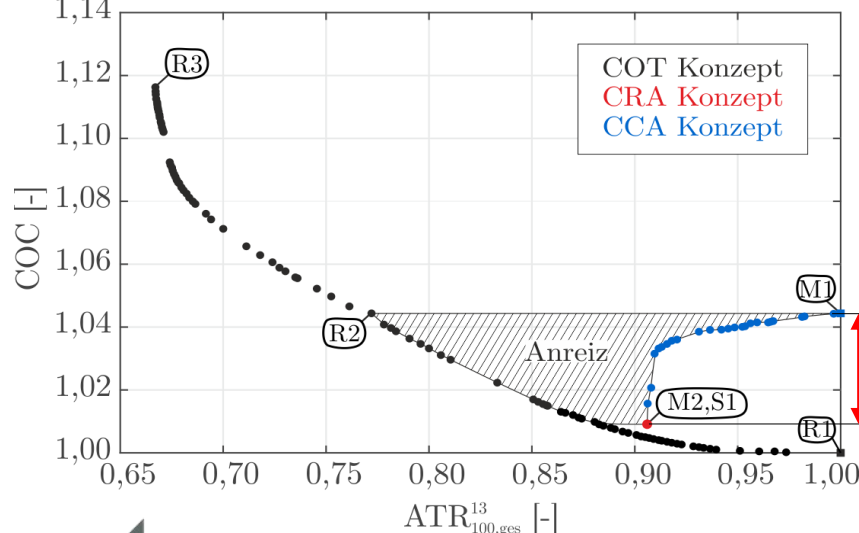
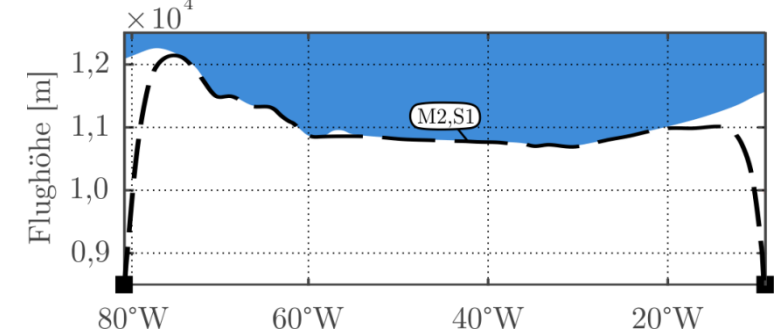
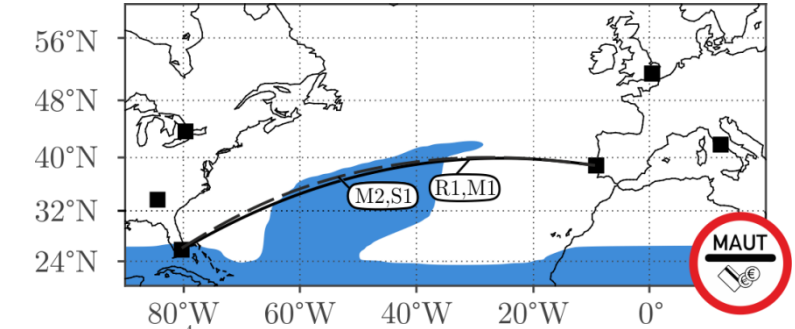
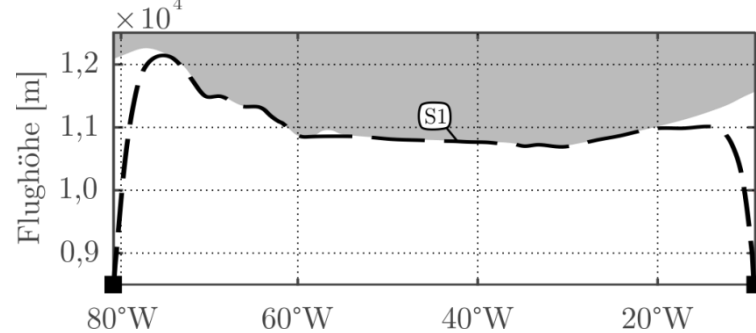
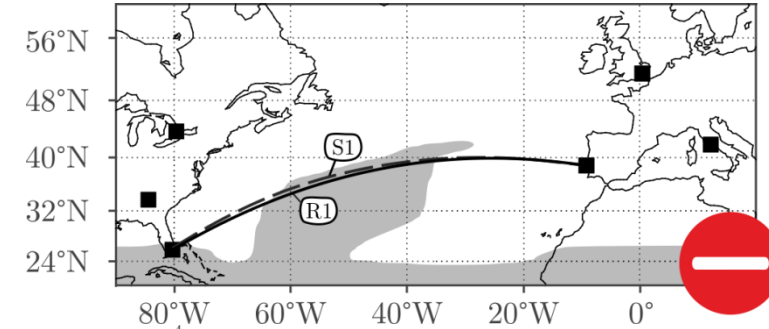
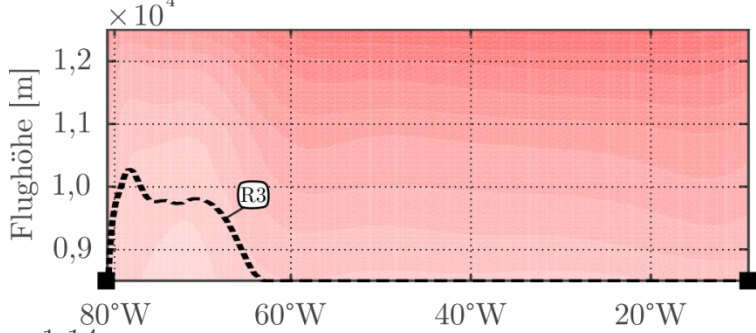
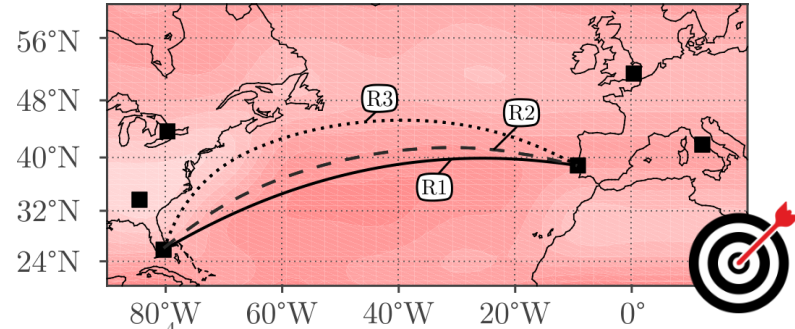
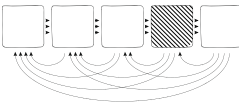




Gewichtungsfaktor Kosten	100.0	[%]
Gewichtungsfaktor Klima	0.0	[%]
Gebührenpflichtiger Luftraum	33.0	[%]
Klimamautgebührenhöhe	0.500	[\$/km]
Betriebskosten (COC)	1.043	[-]
Klimawirkung (ATR)	1.000	[-]
Treibstoffverbrauch	1.000	[-]
Flugzeit	1.000	[-]

konstant





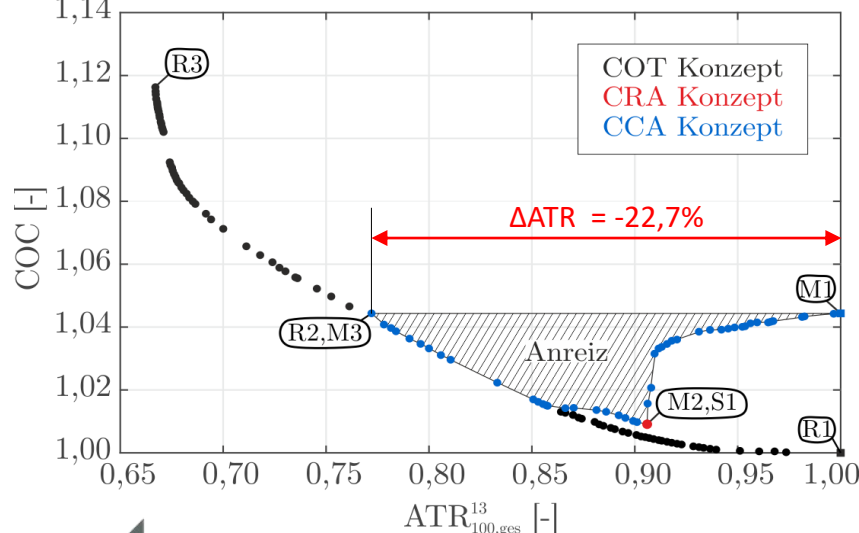
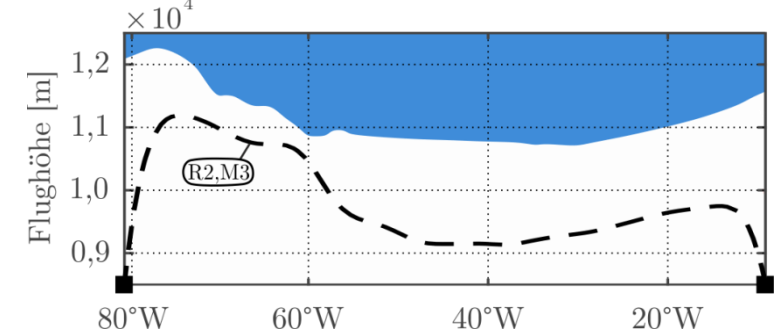
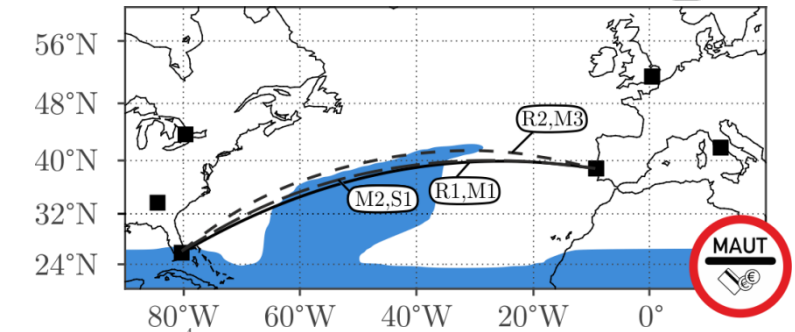
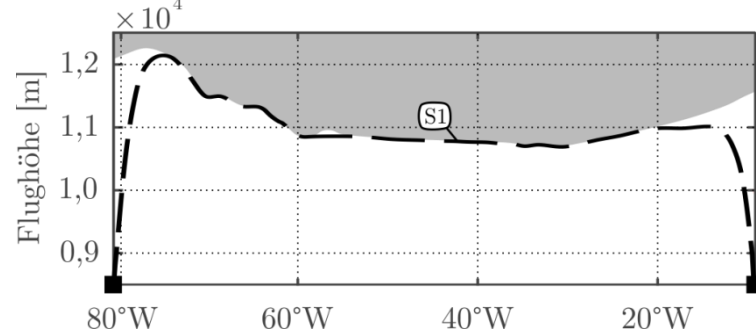
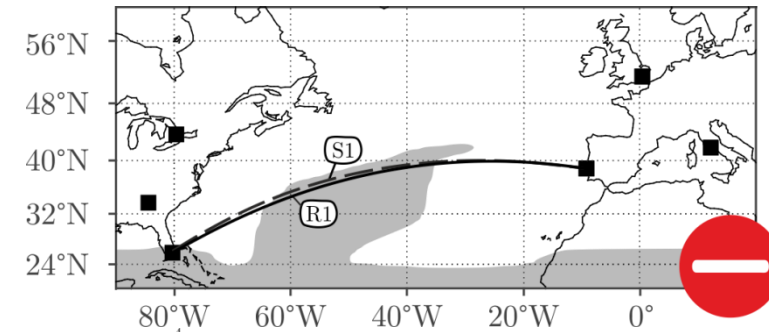
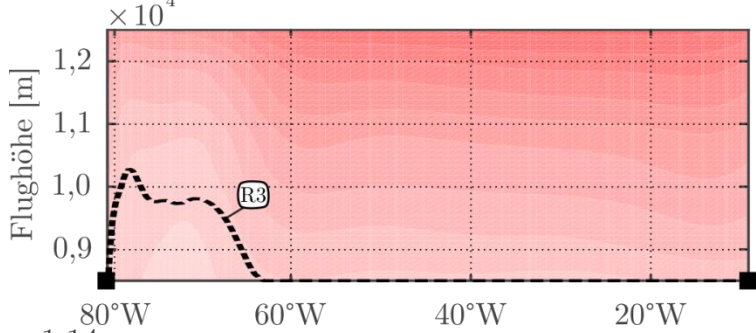
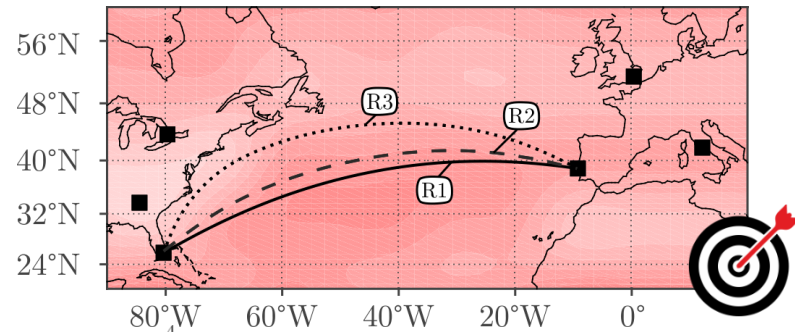
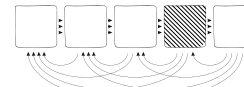
Gewichtungsfaktor Kosten	100.0	[%]
Gewichtungsfaktor Klima	0.0	[%]
Gebührenpflichtiger Luftraum	33.0	[%]
Klimamautgebührenhöhe	0.500	[\$/km]
Betriebskosten (COC)	1.008	[-]
Klimawirkung (ATR)	0.906	[-]
Treibstoffverbrauch	1.021	[-]
Flugzeit	0.998	[-]

klimafreundliches Verhalten
 ≠ kostenfreundlich

← Flugrichtung

Finanzieller Anreiz zur Mitigation:
 $\Delta\text{COC} = -3,4\%$





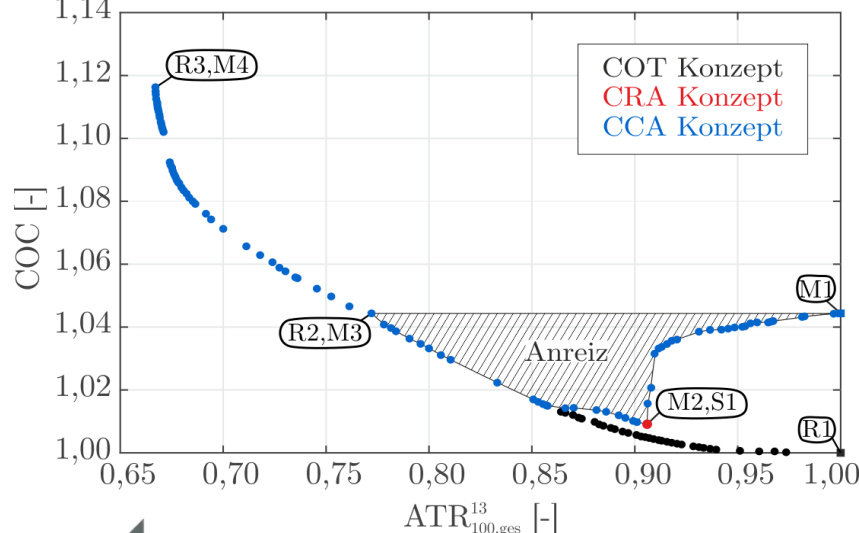
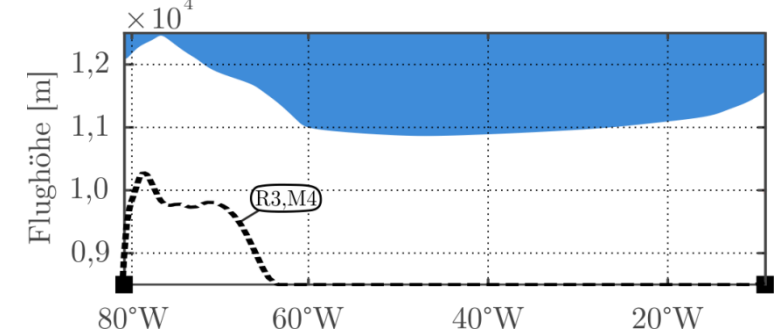
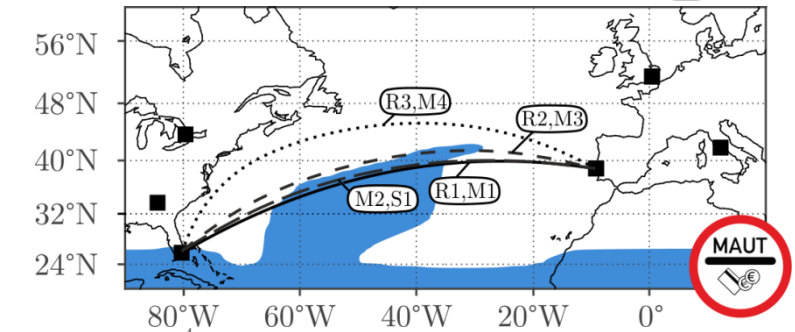
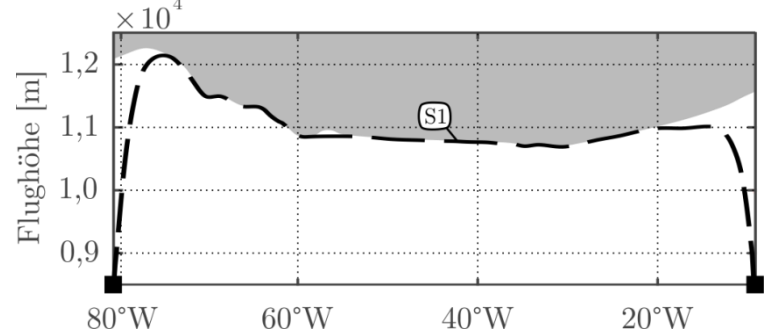
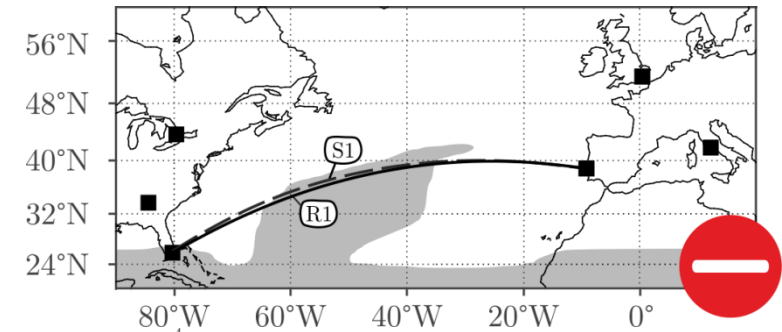
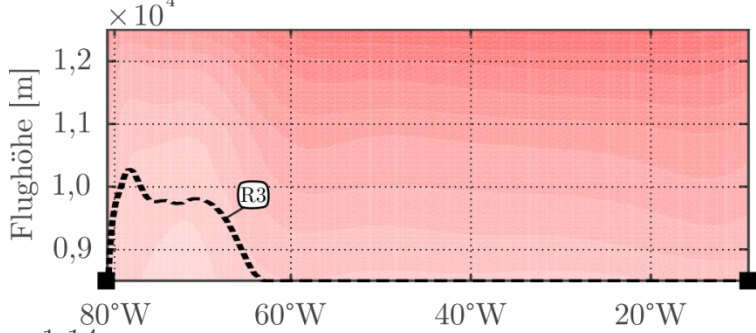
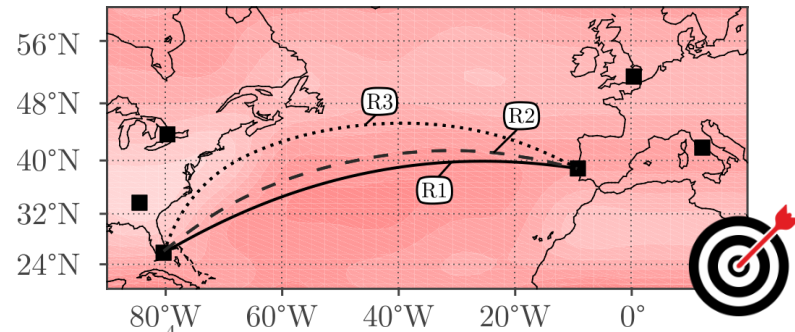
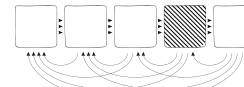
Gewichtungsfaktor Kosten	100.0	[%]
Gewichtungsfaktor Klima	0.0	[%]
Gebührenpflichtiger Luftraum	33.0	[%]
Klimamautgebührenhöhe	0.500	[\$/km]
Betriebskosten (COC)	1.043	[-]
Klimawirkung (ATR)	0.773	[-]
Treibstoffverbrauch	1.114	[-]
Flugzeit	0.986	[-]

konstant



Kostenneutrales Klimaeinsparpotential:
 $\Delta ATR = -22,7\%$





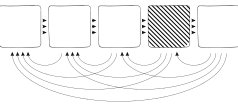
Gewichtungsfaktor Kosten	100.0	[%]
Gewichtungsfaktor Klima	0.0	[%]
Gebührenpflichtiger Luftraum	33.0	[%]
Klimamautgebührenhöhe	0.500	[\$/km]
Betriebskosten (COC)	1.115	[-]
Klimawirkung (ATR)	0.667	[-]
Treibstoffverbrauch	1.250	[-]
Flugzeit	1.010	[-]

konstant



Kein Anreiz mehr zur Mitigation!



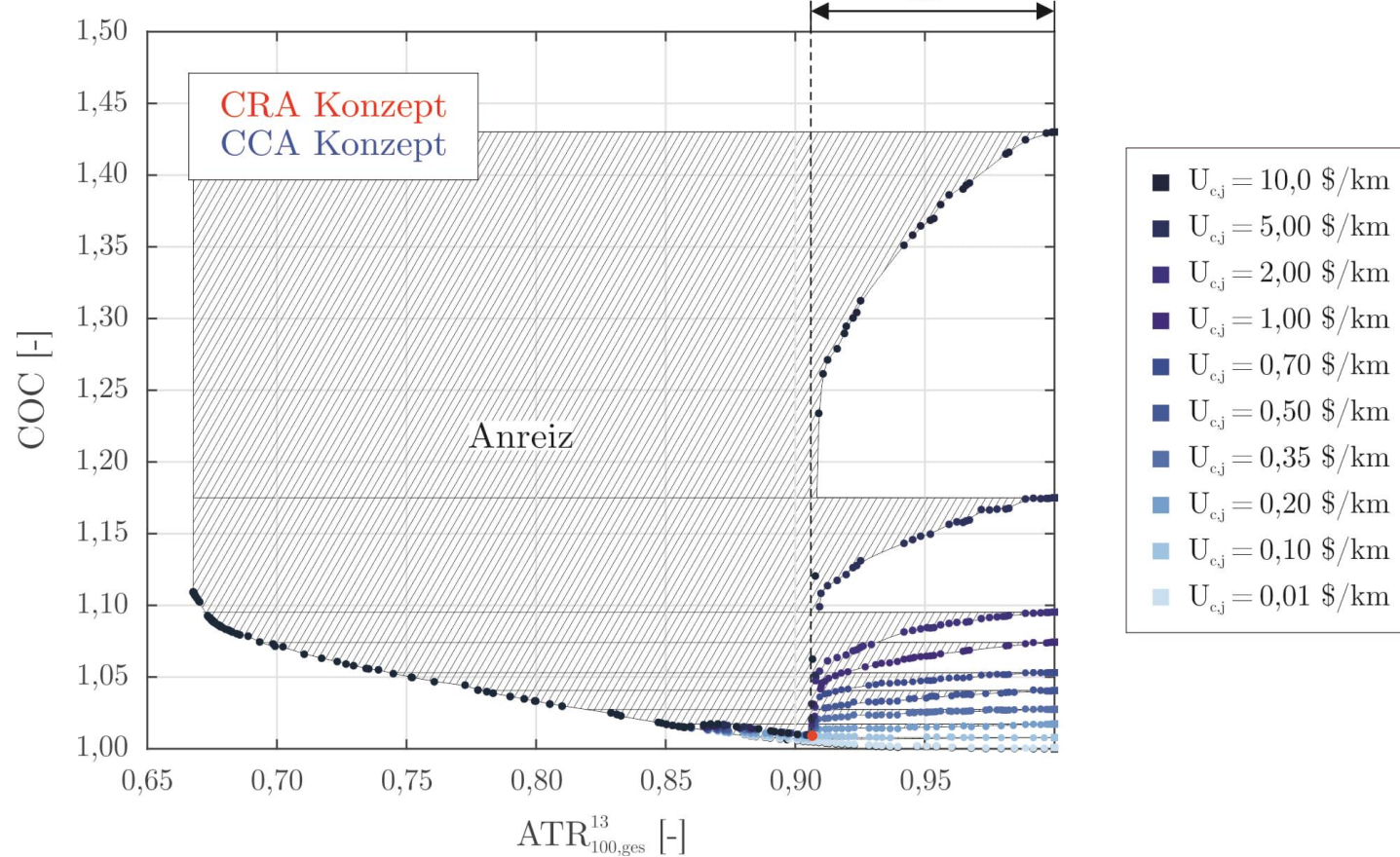


Einfluss der Klimamautgebührenhöhen auf die Anreizwirkung

Konzept der Klimamautgebiete

Mindestmitigationspotenzial:

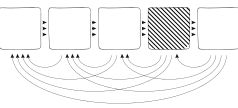
$$\Delta ATR_{\min} = -9,4\%$$



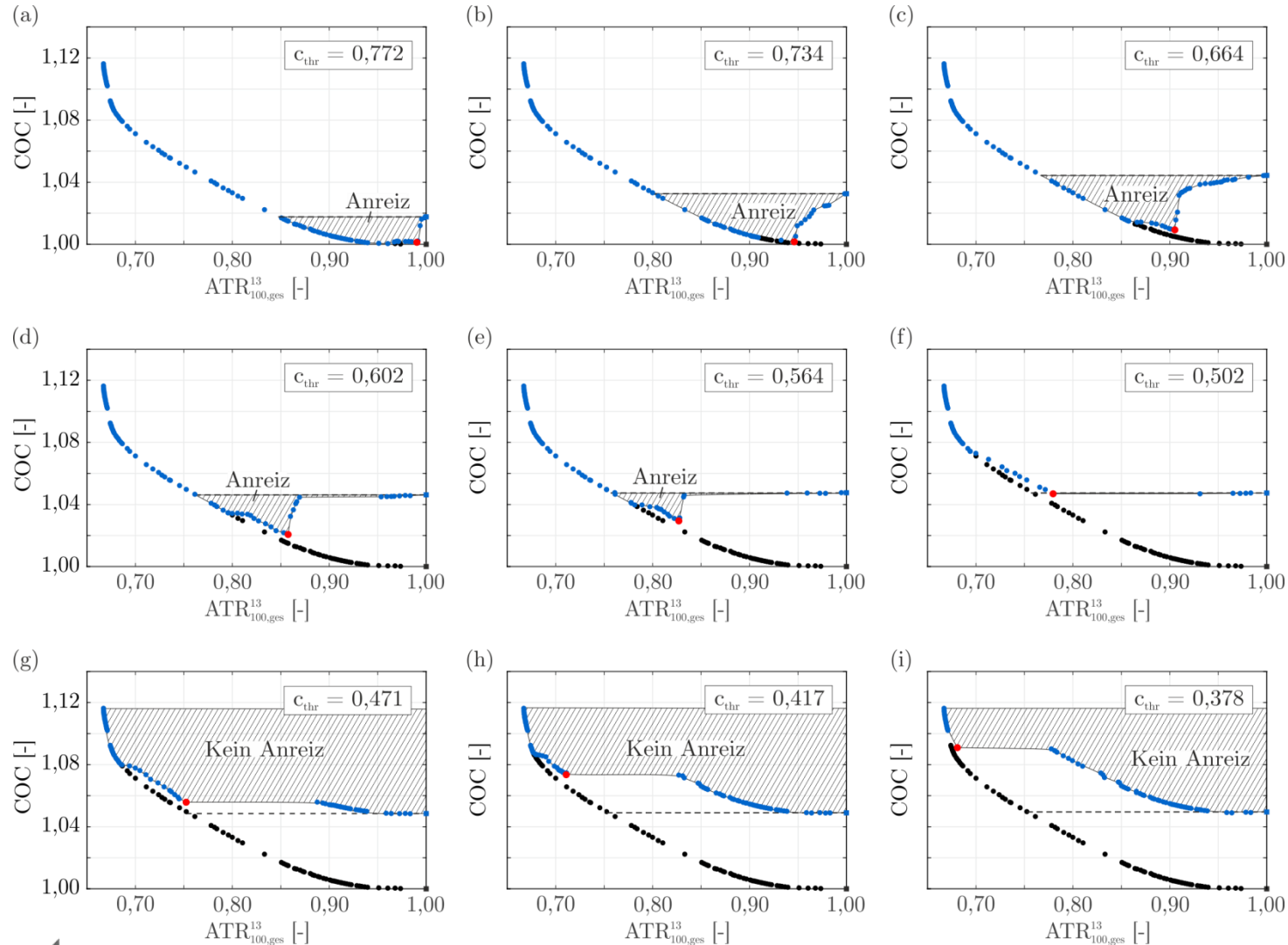
Sensitivitätsanalyse der Gebührenhöhe	
Anzahl Routen	1
Gebührenhöhe	variabel
Schwellenwert	konstant
Klimawirkungsfunktionen	Jahresmittel

Der Mitigationsanreiz steigt mit steigender Gebührenhöhe.





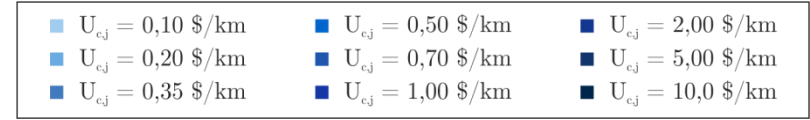
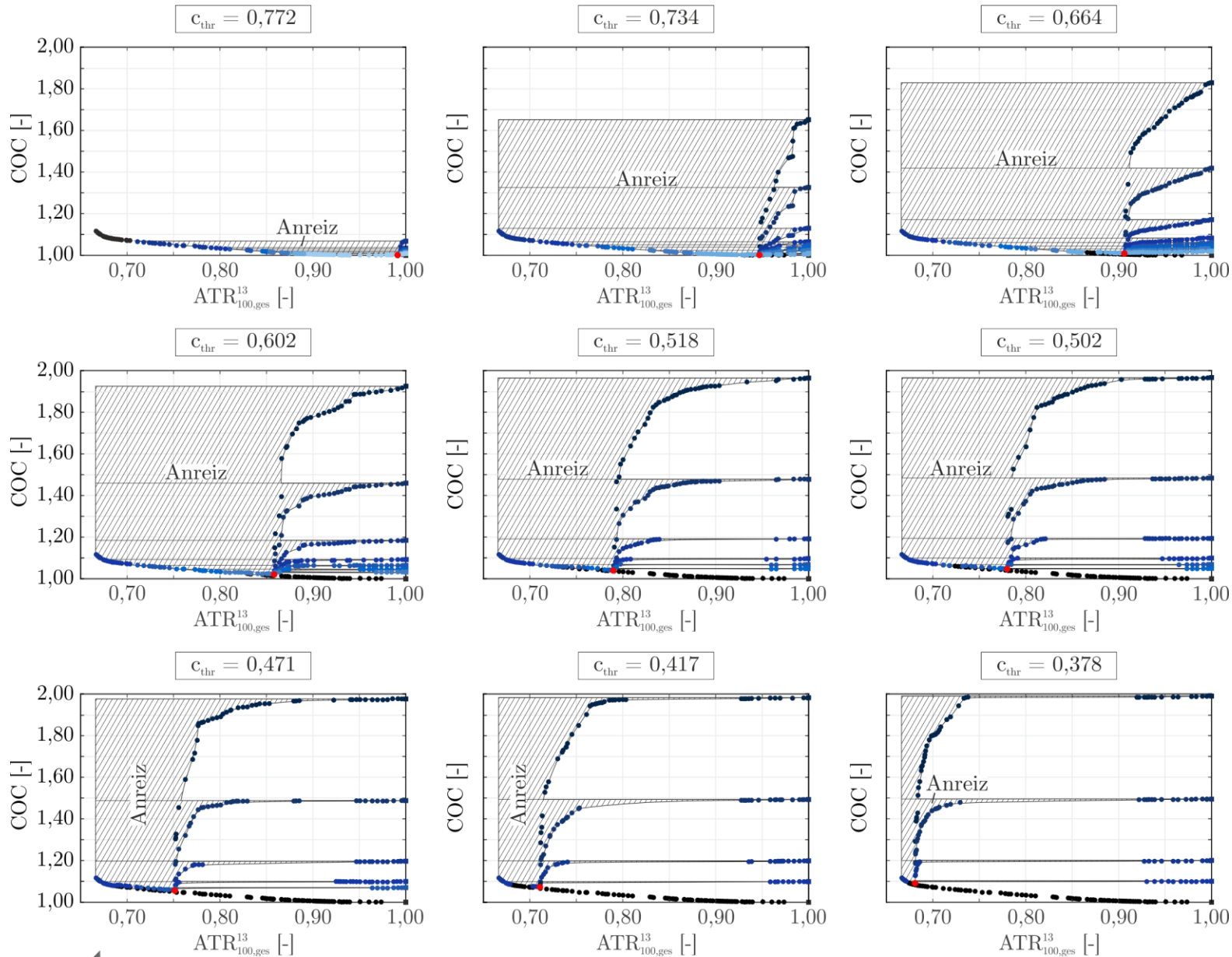
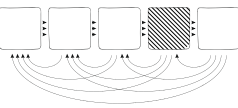
Einfluss des Schwellenwertes (c_{thr}) auf das Mitigationspotenzial



Sensitivitätsanalyse der Gebührenhöhe	
Anzahl Routen	1
Gebührenhöhe	konstant
Schwellenwert	variabel
Klimawirkungsfunktionen	Jahresmittel

Das Mitigationspotential steigt mit sinkendem Schwellenwert (mit zunehmender Größe des Mautgebietes).

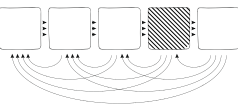




Sensitivitätsanalyse des Schwellenwertes und der Gebührenhöhe	
Anzahl Routen	1
Schwellenwert	variabel
Gebührenhöhe	variabel
Klimawirkungsfunktionen	Jahresmittel

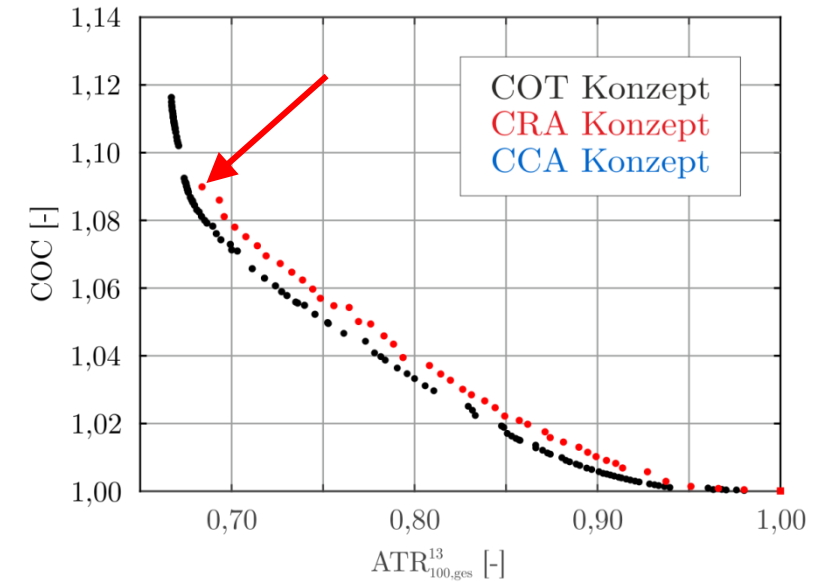
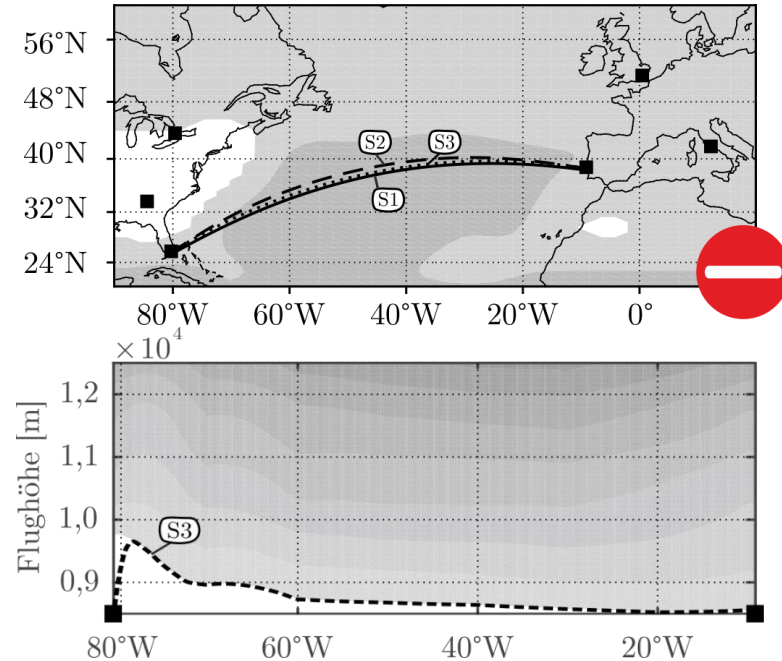
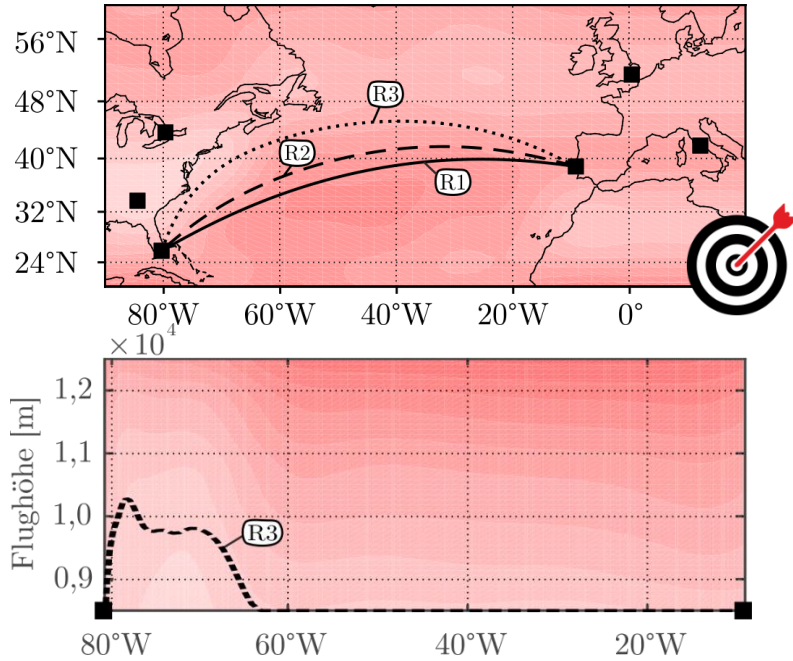
Durch gezielte Wahl von Schwellenwert & Gebührenhöhe kann auf einer Route für jedes Mitigationspotenzial ein finanzieller Anreiz fürs klimafreundliche Fliegen erzeugt werden!





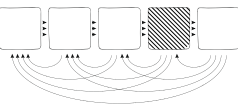
Einfluss des Schwellenwertes (c_{thr}) auf das Mitigationspotenzial

Konzept der Klimasperrgebiete



Das Konzept der Klimasperrgebiete ist zwar sehr effektiv, hat aber einen zu großen Einfluss auf die Luftraumkapazität!



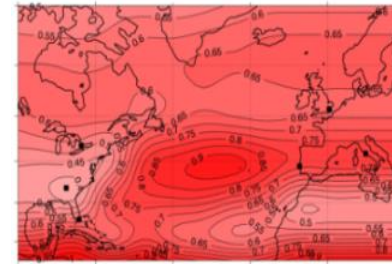
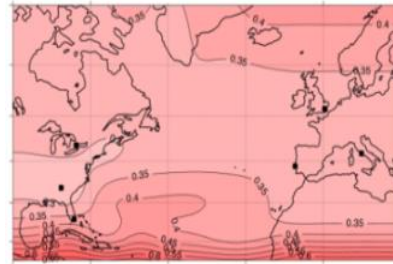
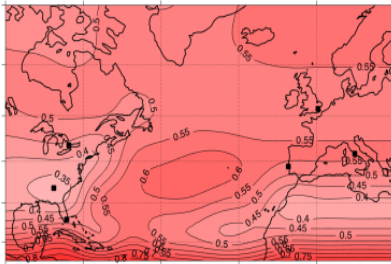


Jahresmittel

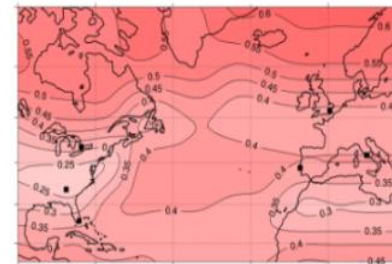
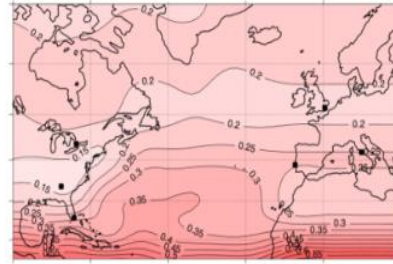
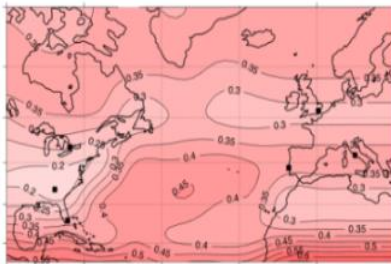
Februar

August

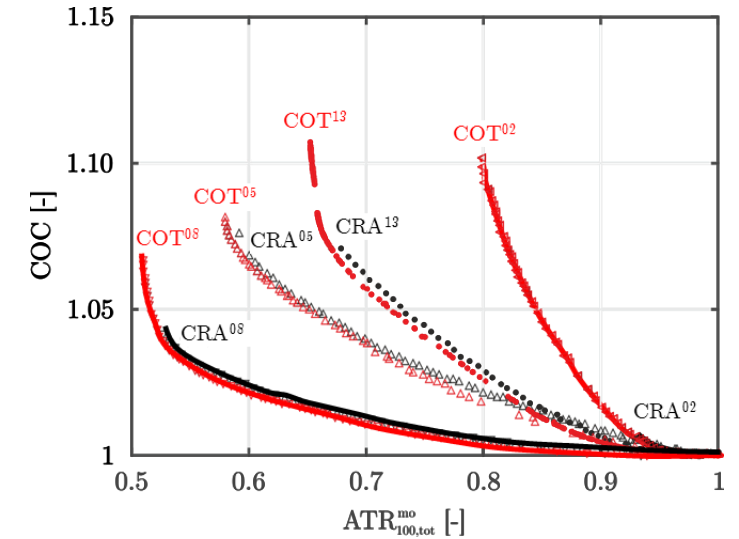
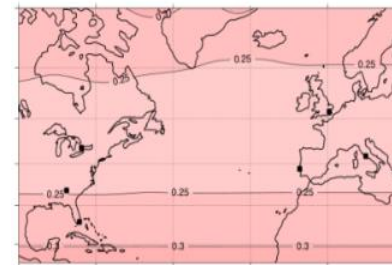
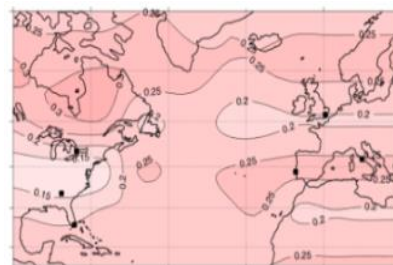
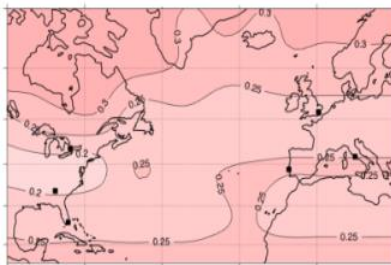
12.500 m



10.500 m



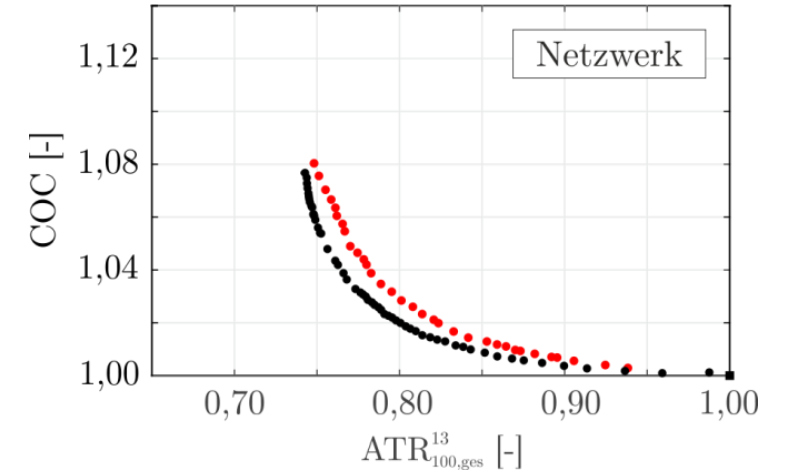
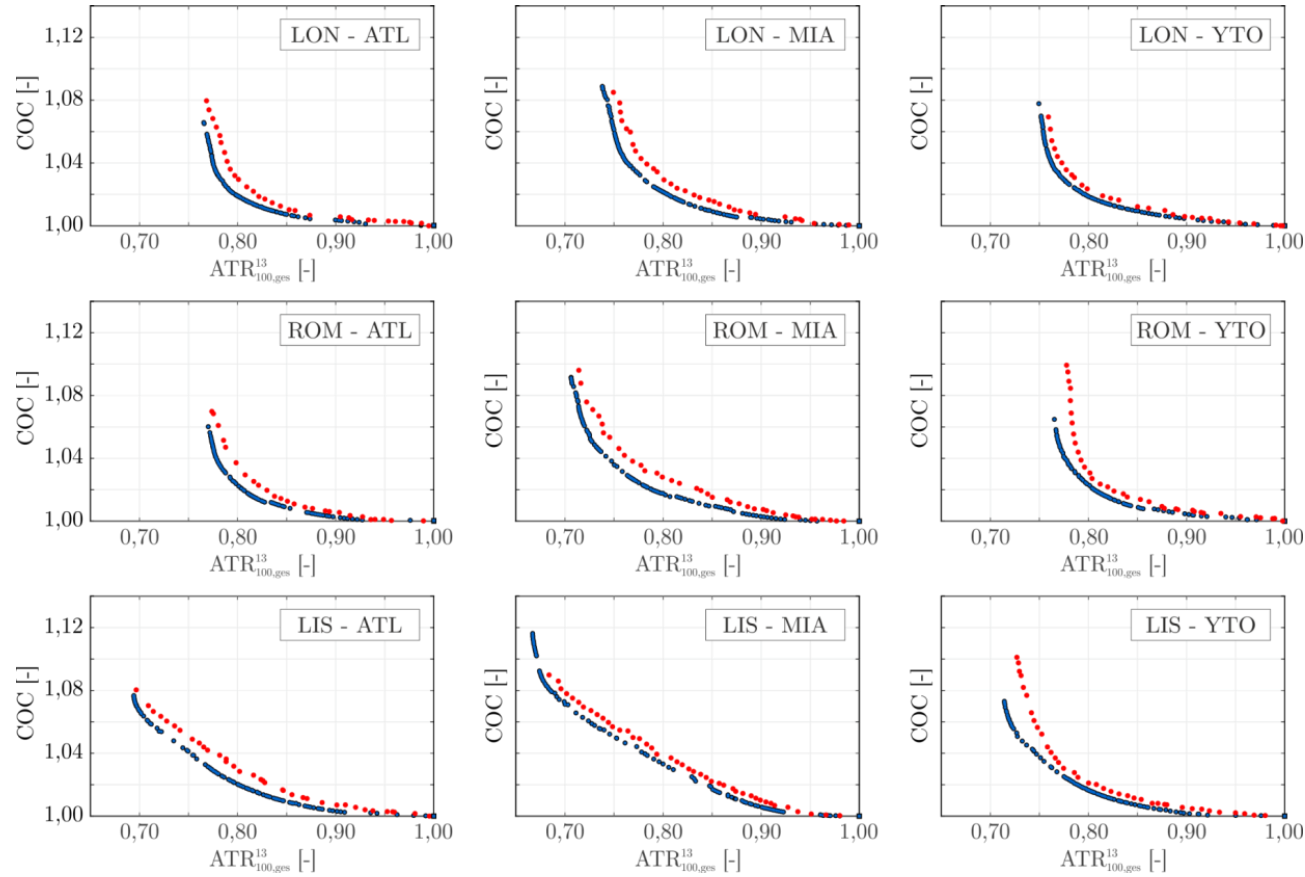
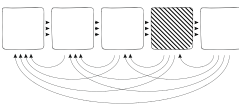
8.500 m



Sensitivitätsanalyse des Schwellenwertes und der Gebührenhöhe	
Anzahl Routen	1
Schwellenwert	variabel
Gebührenhöhe	konstant
Klimawirkungsfunktionen	variabel

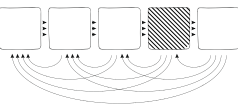
Die Mitigationshöhe der Konzepte fluktuiert stark mit den saisonalen Schwankungen in der Klimawirksamkeit der Luftverkehrsemissionen: Klimafreundliches Fliegen ist in Sommermonaten besonders effektiv.





Sensitivitätsanalyse im Routennetzwerk	
Anzahl Routen	9
Schwellenwert	variabel
Gebührenhöhe	variabel
Klimawirkungsfunktionen	Jahresmittel



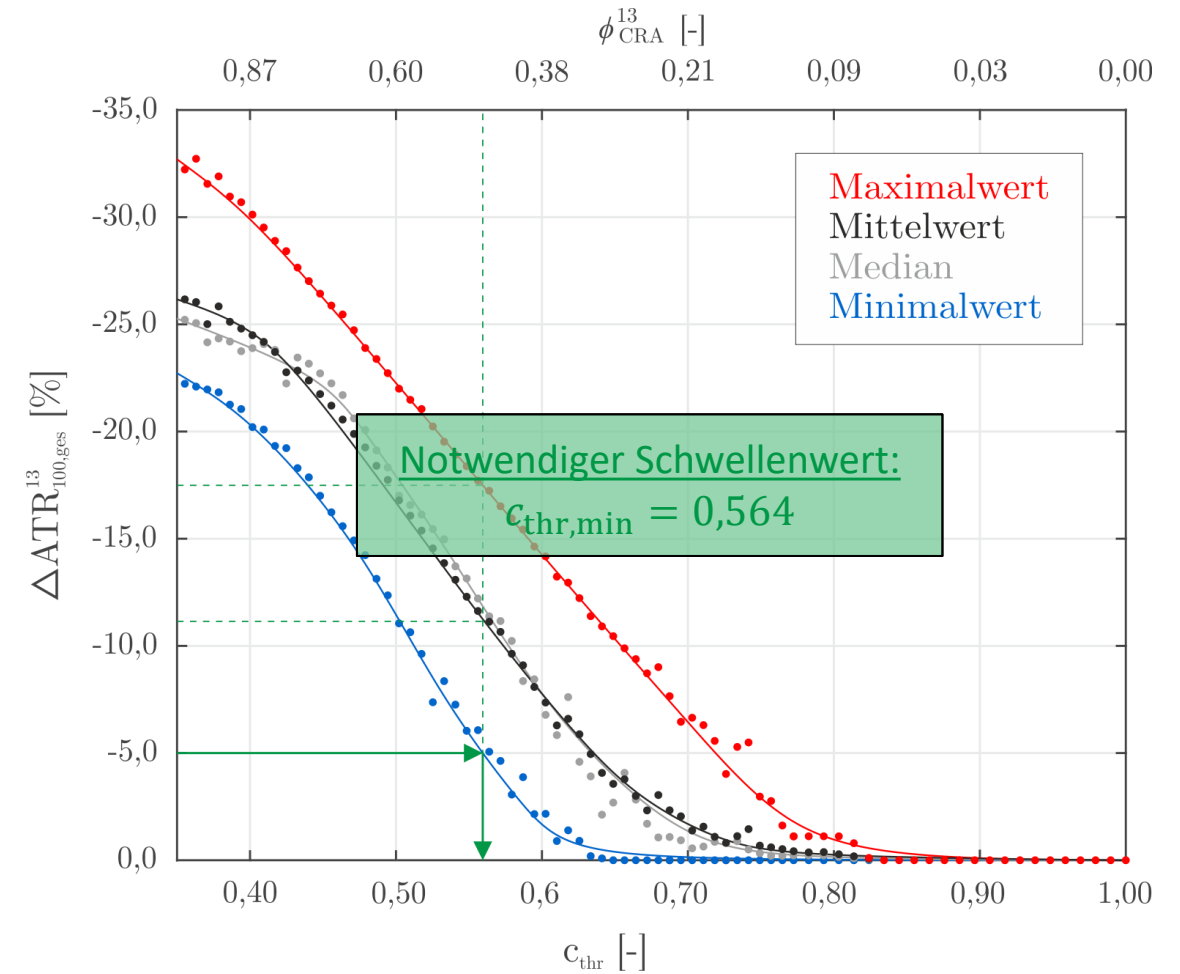


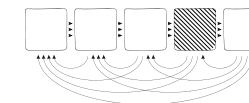
Konzept der Klimamautgebiete

Auslegung für ein spezifisches Klimaziel

Ist die Zielerreichung von Klimazielen sichergestellt?
(z.B. ein Mindesteinsparpotential von 5% der Klimawirkung pro Flug)

Welche Klimamautgebührenhöhe ist notwendig,
um im Nordatlantik einen finanziellen Anreiz zum Erreichen des Klimaziels zu erzeugen?



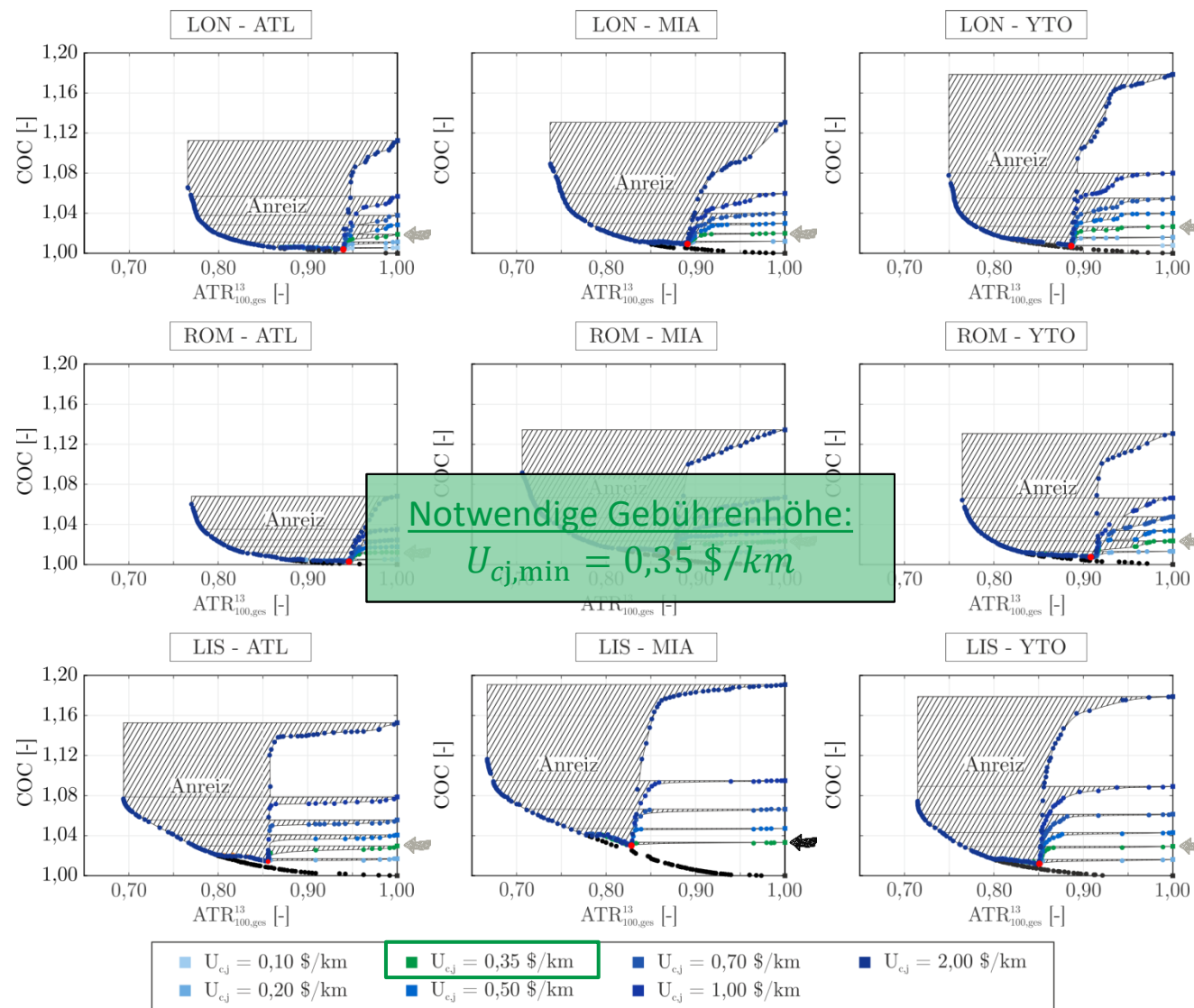


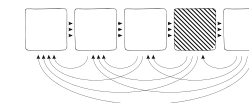
Konzept der Klimamautgebiete

Auslegung für ein spezifisches Klimaziel

Ist die Zielerreichung von Klimazielen sichergestellt?
(z.B. ein Mindesteinsparpotential von 5% der Klimawirkung pro Flug)

Welche Klimamautgebührenhöhe ist notwendig,
um im Nordatlantik einen finanziellen Anreiz
zum Erreichen des Klimaziels zu erzeugen?



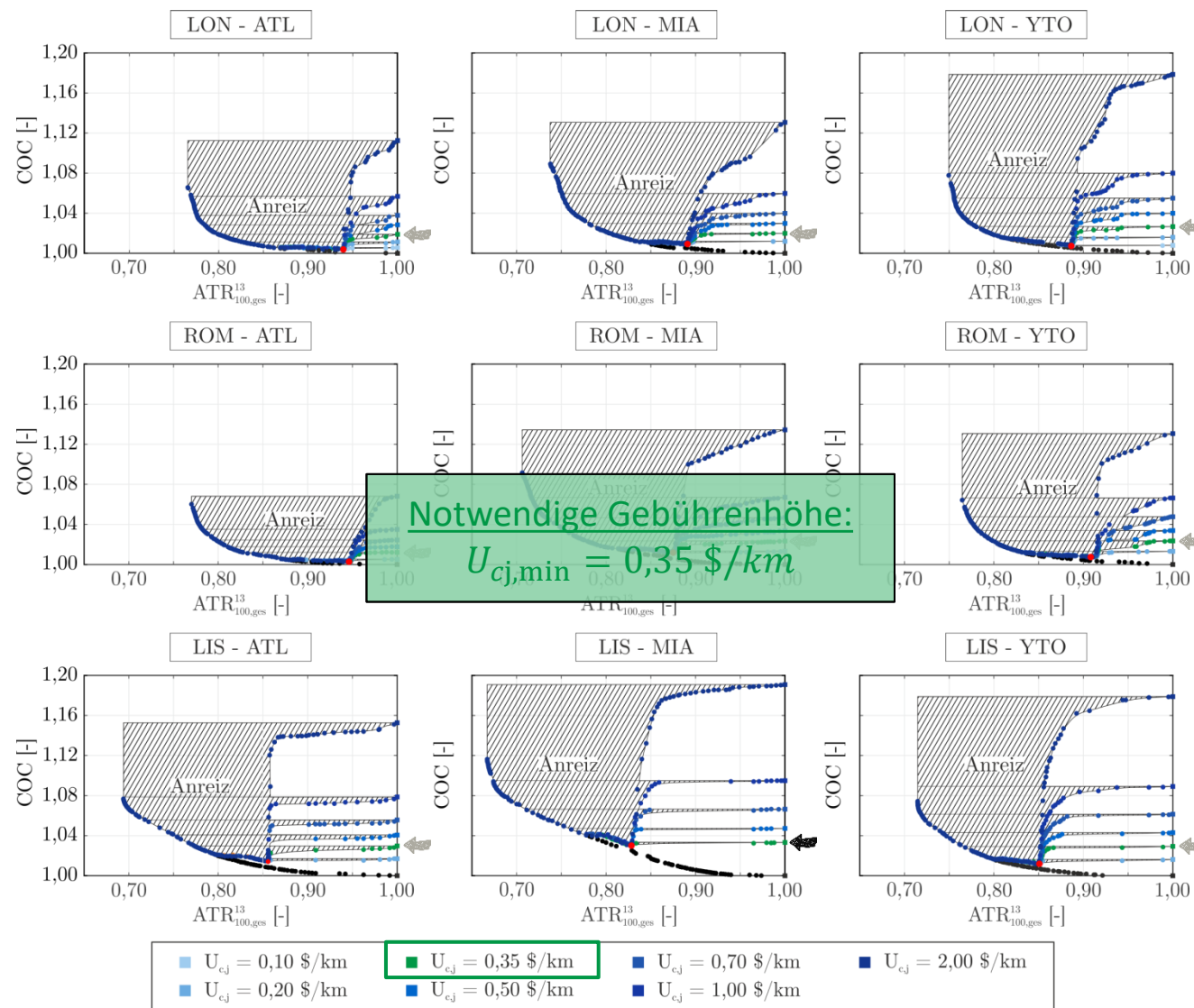


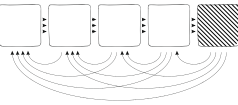
Konzept der Klimamautgebiete

Auslegung für ein spezifisches Klimaziel

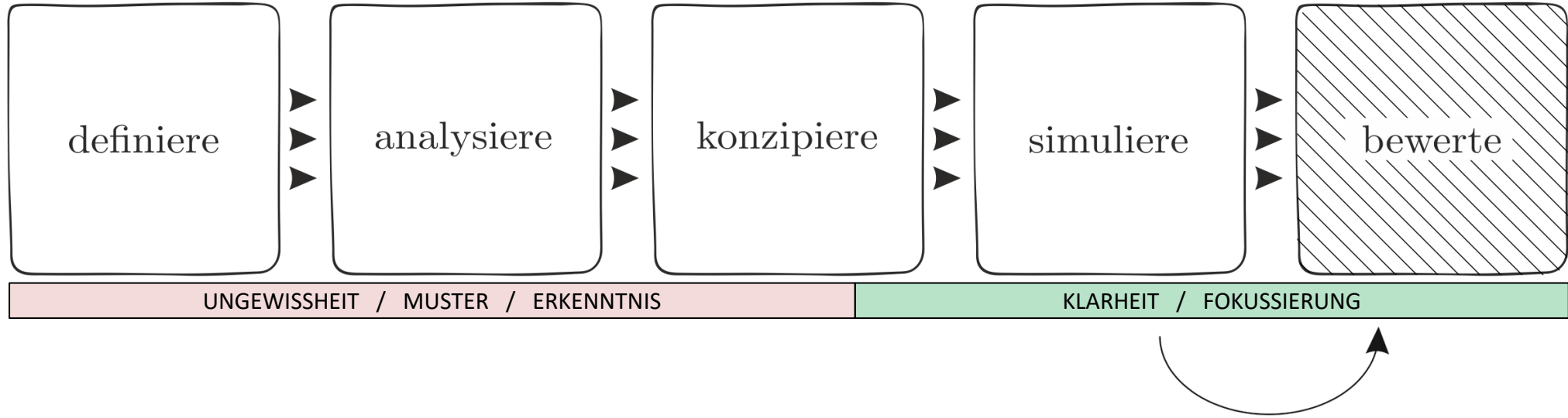
Das Konzept der Klimamautgebiete kann somit explizit für ein spezifisches Klimaziel ausgelegt werden!

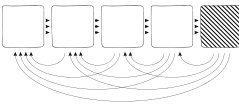
Durch geschickte Wahl des Schwellenwertes und der Gebührenhöhe kann auf jeder Route eines Netzwerkes ein finanzieller Anreiz zum Erreichen eines gewünschten Klimaziels erzeugt werden.





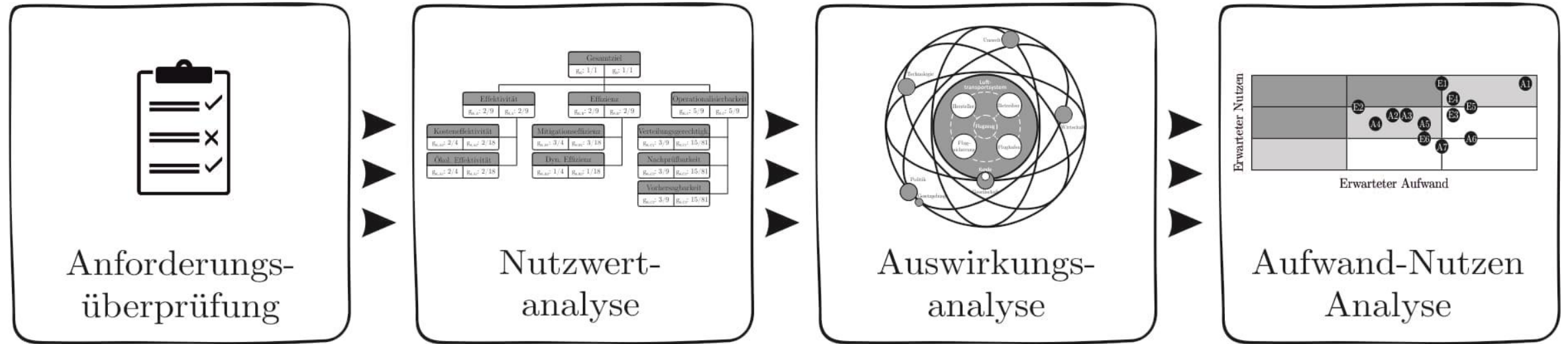
Konzeptbewertung

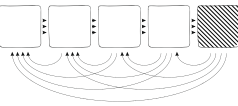




Konzeptbewertung

In dieser Arbeit durchgeführte Bewertungsarten





Konzeptbewertung

Anforderungsüberprüfung

	Anforderungen	Konzeptalternativen		
		COT	CRA	CCA
Anf. des LTS	Gewährleiste einen sicheren und zuverlässigen Flugbetrieb	✓	✓	✓
	Gewährleiste eine gleichbleibende Luftraumkapazität	(✓)	(-)	(✓)
	Gewährleiste eine einfache Kontrollierbarkeit des Systems	(-)	✓	✓
	Ermögliche eine Transparenz und eine Nachvollziehbarkeit des Systems	(-)	✓	✓
Ökologische Anf.	Setze das Vorsorgeprinzip um	✓	✓	✓
	Reduziere die Klimawirkung an Stelle der Emissionsmenge	✓	✓	✓
	Berücksichtige die Orts- und Zeitabhängigkeit von Nicht-CO ₂ -Effekten	✓	✓	✓
	Ermögliche sowohl eine globale als auch lokale Einführung	✓	✓	✓
	Ermögliche eine zeitnahe Einführung	(-)	✓	✓
	Ermögliche eine an den LOSU adaptierbare Einführung	✓	✓	✓

✓ vollständig erfüllt, ✓ teilweise erfüllt, (-) nicht erfüllt, (x) nicht vorhanden

	Anforderungen	Konzeptalternativen			Rang
		COT	CRA	CCA	
Ökonomische Anf.	Setze das Verursacherprinzip um	✓	✓	✓	3
	Ermögliche eine Preisparität für klima- und kostenoptimales Fliegen	(-)	(✓)	✓	
	Schaffe finanzielle Anreize bzw. eine Notwendigkeit zum Klimaschutz	(-)	✓	✓	
	Schaffe finanzielle Anreize für grüne Technologien	(✓)	(✓)	✓	
	Ermögliche eine einfache Kostenberechnung während der Flugplanung	(-)	✓	✓	
	Begrenze das Risiko negativer Mitigationsanreize	✓	(-)	(✓)	
	Verwende alle Einnahmen zweckgebunden zum Klimaschutz	(x)	(x)	✓	
				2	
				1	

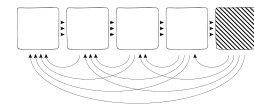
✓ vollständig erfüllt, ✓ teilweise erfüllt, (-) nicht erfüllt, (x) nicht vorhanden

COT := Concept of Climate-Optimized Trajectories (Reference)

CRA := Concept of Climate-Restricted Airspace Area

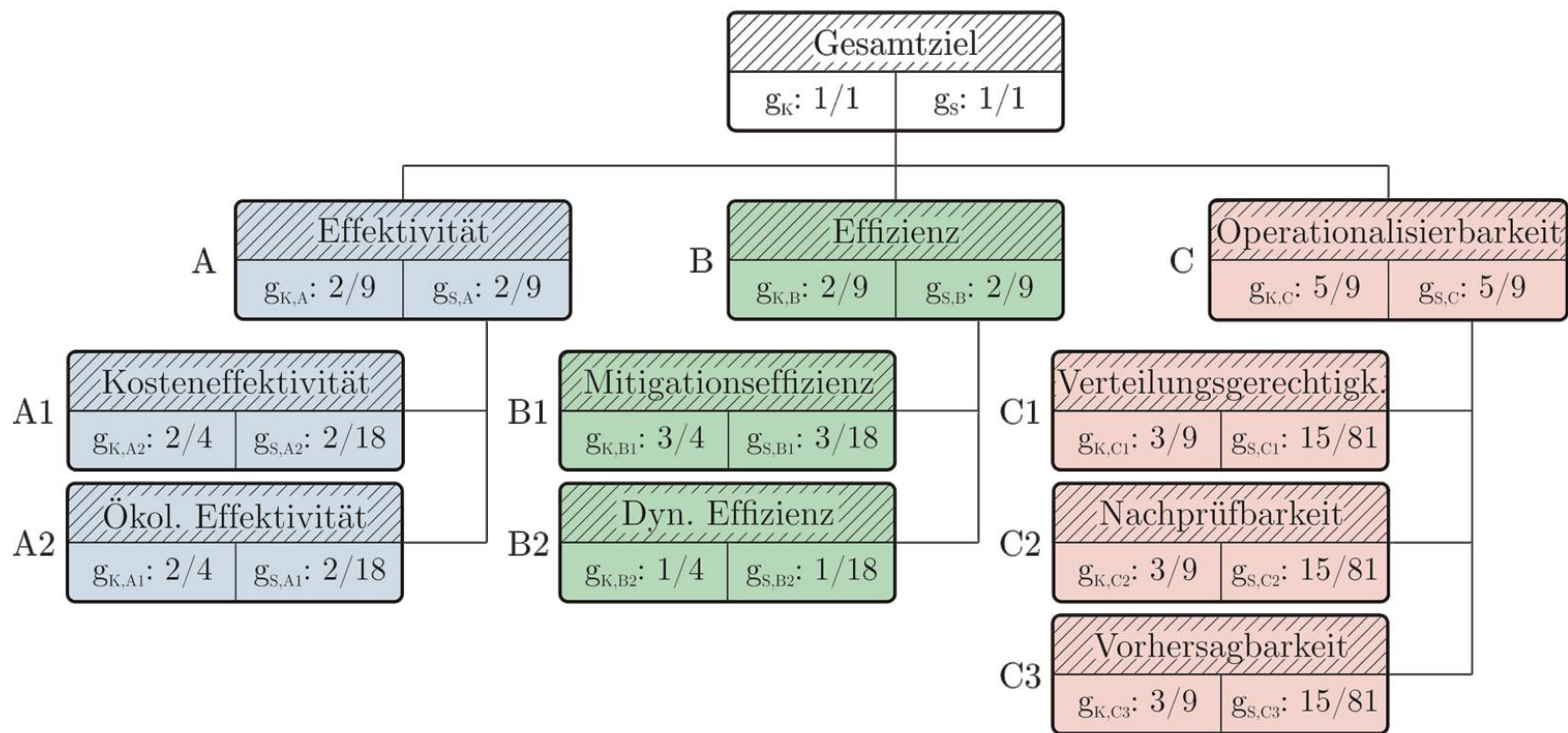
CCA := Concept of Climate-Charged Airspace Area





Konzeptbewertung

Nutzwertanalyse



	A	B	C	
A	1	1	0	$g_{K,A}: 2/9$
B	1	1	0	$g_{K,B}: 2/9$
C	2	2	1	$g_{K,C}: 5/9$

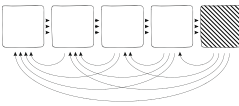
	A1	A2	
A1	1	1	$g_{K,A1}: 2/4$
A2	1	1	$g_{K,A2}: 2/4$

	B1	B2	
B1	1	2	$g_{K,B1}: 3/4$
B2	0	1	$g_{K,B2}: 1/4$

	C1	C2	C3	
C1	1	1	1	$g_{K,C1}: 3/9$
C2	1	1	1	$g_{K,C2}: 3/9$
C3	1	1	1	$g_{K,C3}: 3/9$

angelehnt an Zangenmeister (1971)





Konzeptbewertung

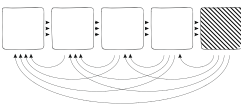
Nutzwertanalyse

Bewertungskriterien		Gewicht	Konzeptbewertung				
			COT	CRA	CCA		
A1	Kosteneffektivität	2/18	x	9	8	8	9: sehr positiv 7: positiv 5: neutral 3: negativ 1: sehr negativ
A2	Ökologische Effektivität	2/18	x	7	6	7	
B1	Mitigationseffizienz	3/18	x	5	5	7	
B2	Dynamische Effizienz	1/18	x	7	7	9	
C1	Verteilungsgerechtigkeit	15/81	x	7	7	7	
C2	Nachprüfbarkeit	15/81	x	3	9	7	
C3	Vorhersagbarkeit	15/81	x	3	7	8	
				41 / 63	49 / 63	53 / 63	Punkte
				60,1%	78,2%	82,3%	rel. Nutzwert
				3	2	1	Rang

COT := Concept of Climate-Optimized Trajectories (Reference)
 CRA := Concept of Climate-Restricted Airspace Area
 CCA := Concept of Climate-Charged Airspace Area

angelehnt an Zangenmeister (1971)

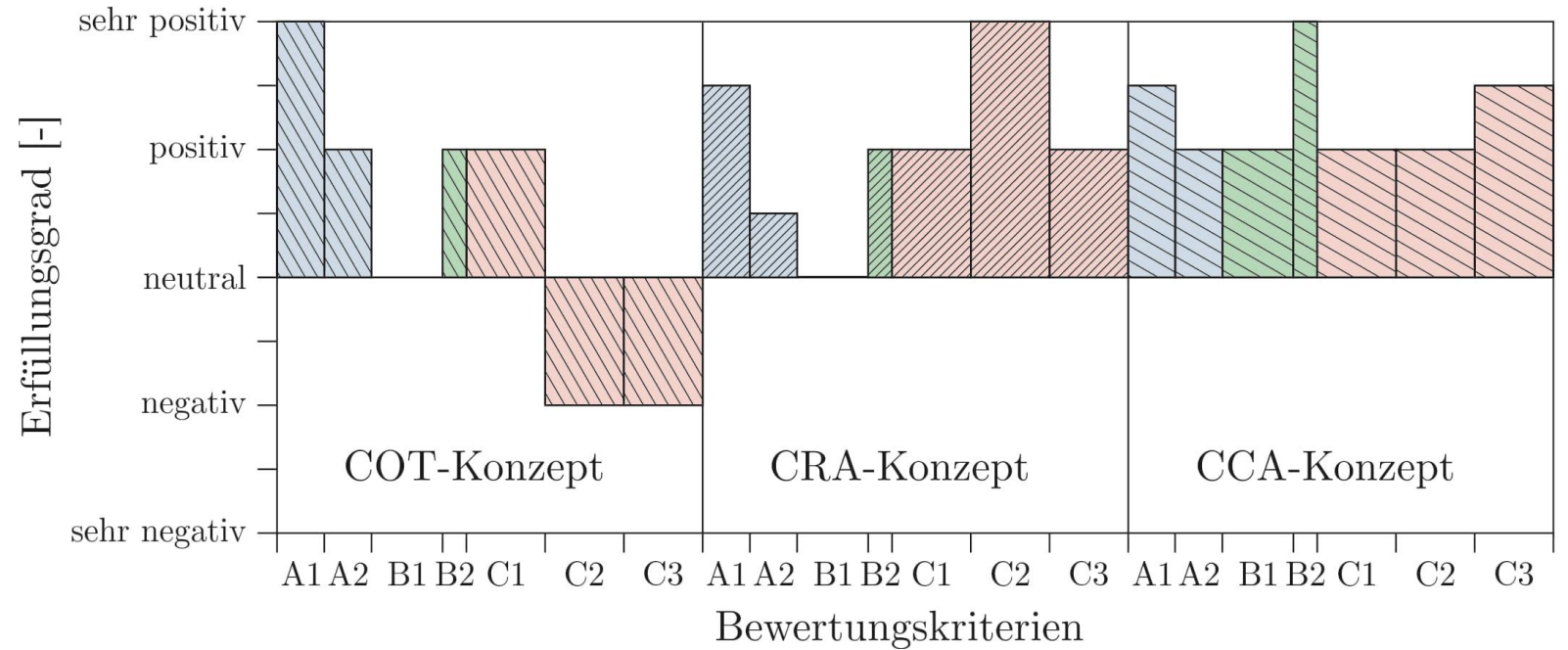




Konzeptbewertung

Nutzwertprofil

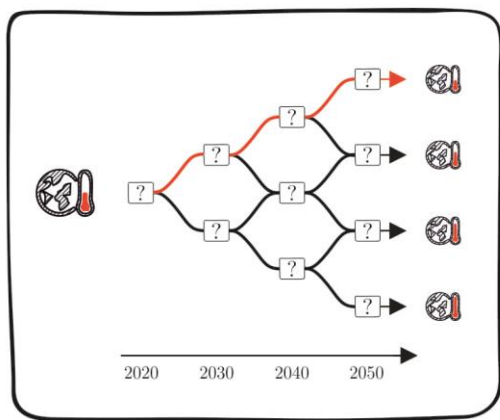
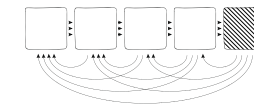
Bewertungskriterien		Gewicht
A1	Kosteneffektivität	2/18
A2	Ökologische Effektivität	2/18
B1	Mitigationseffizienz	3/18
B2	Dynamische Effizienz	1/18
C1	Verteilungsgerechtigkeit	15/81
C2	Nachprüfbarkeit	15/81
C3	Vorhersagbarkeit	15/81



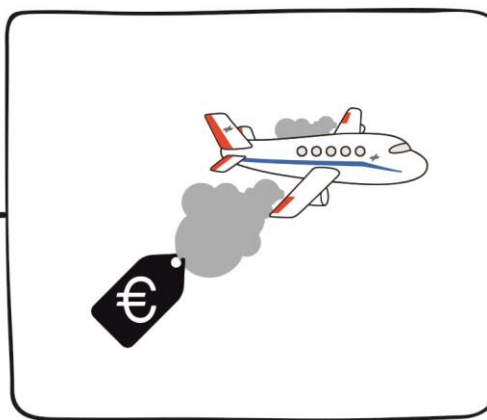
COT := Concept of Climate-Optimized Trajectories (Reference)
 CRA := Concept of Climate-Restricted Airspace Area
 CCA := Concept of Climate-Charged Airspace Area

angelehnt an Zangenmeister (1971)





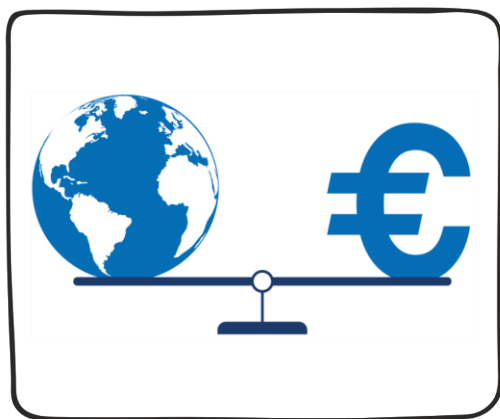
Umsetzung des
Vorsorgeprinzips



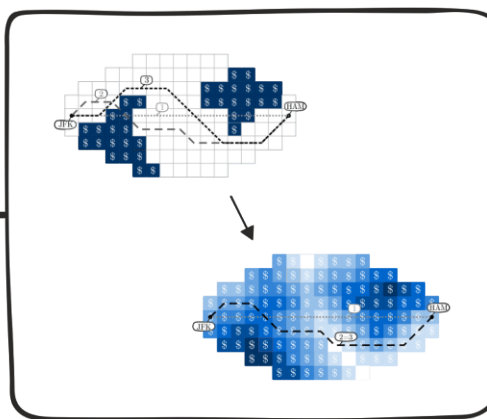
Umsetzung des
Verursacherprinzips

91,3%

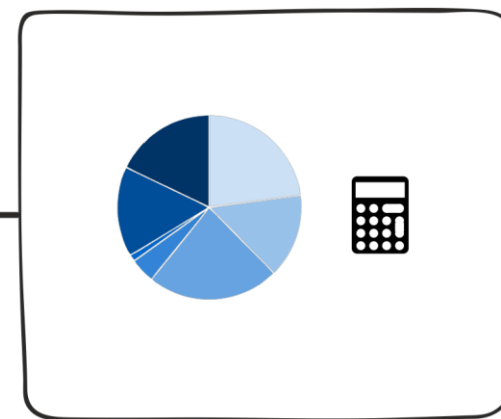
„Focus on the big fish“
Ansatz sehr effektiv



Zielkonflikt aufgelöst

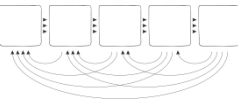


Kurzfristige Einführbarkeit
sichergestellt

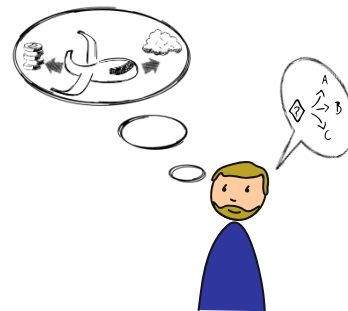
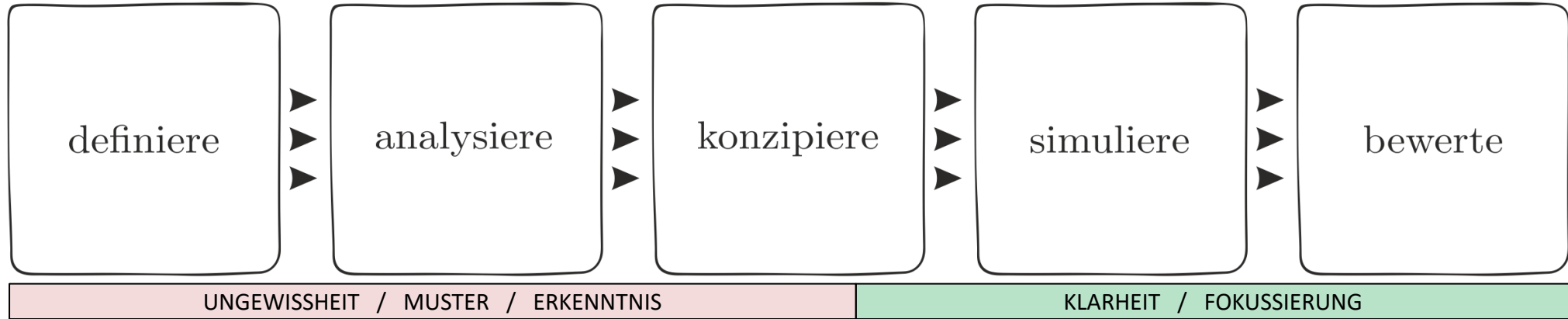


Einfache Flugplanung, Bericht-
erstattung & Verifizierung

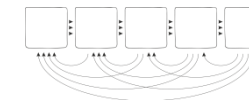




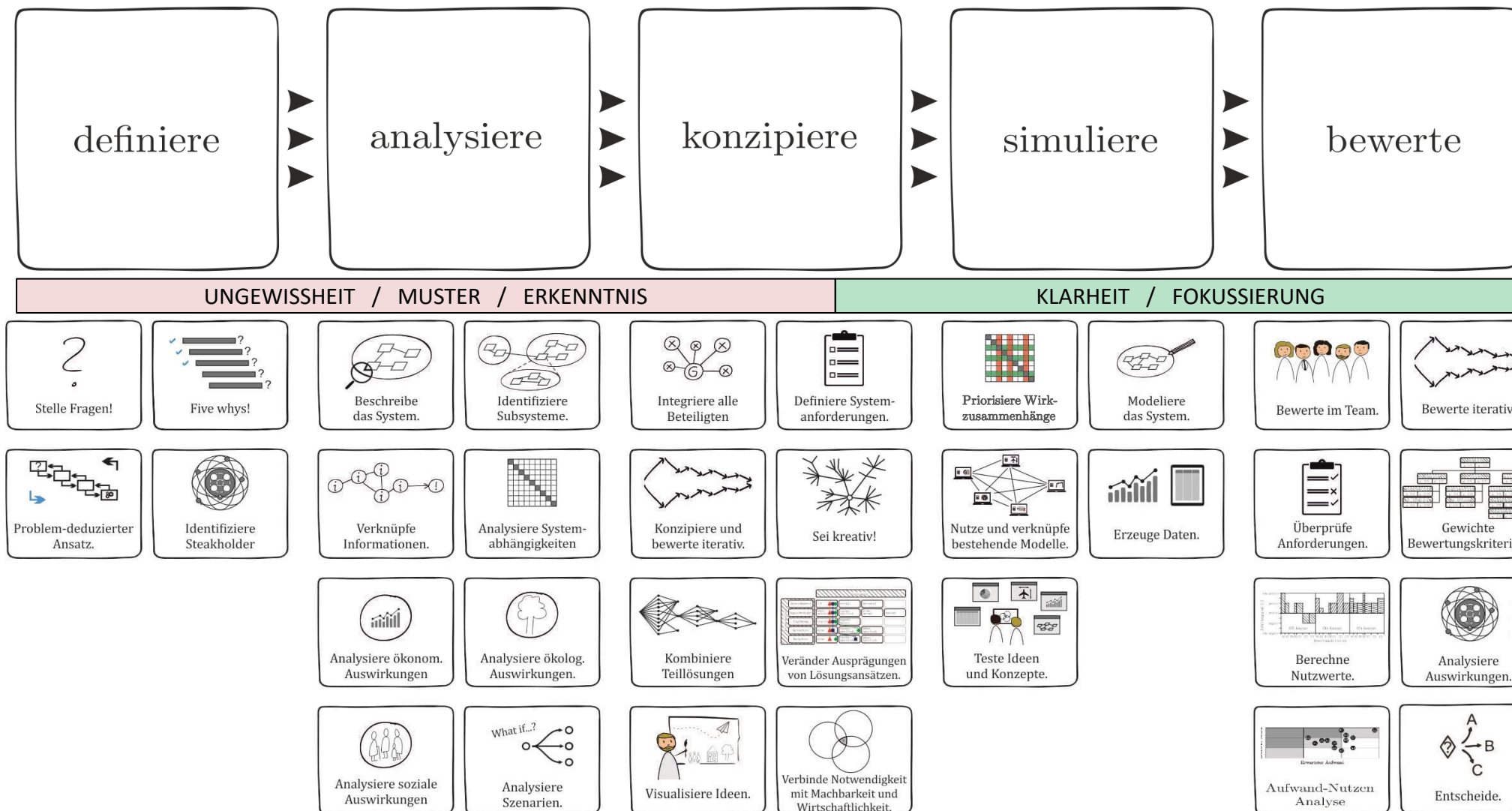
Zusammenfassung des Konzeptes der Klimamautgebiete

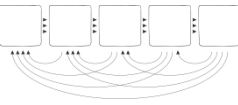




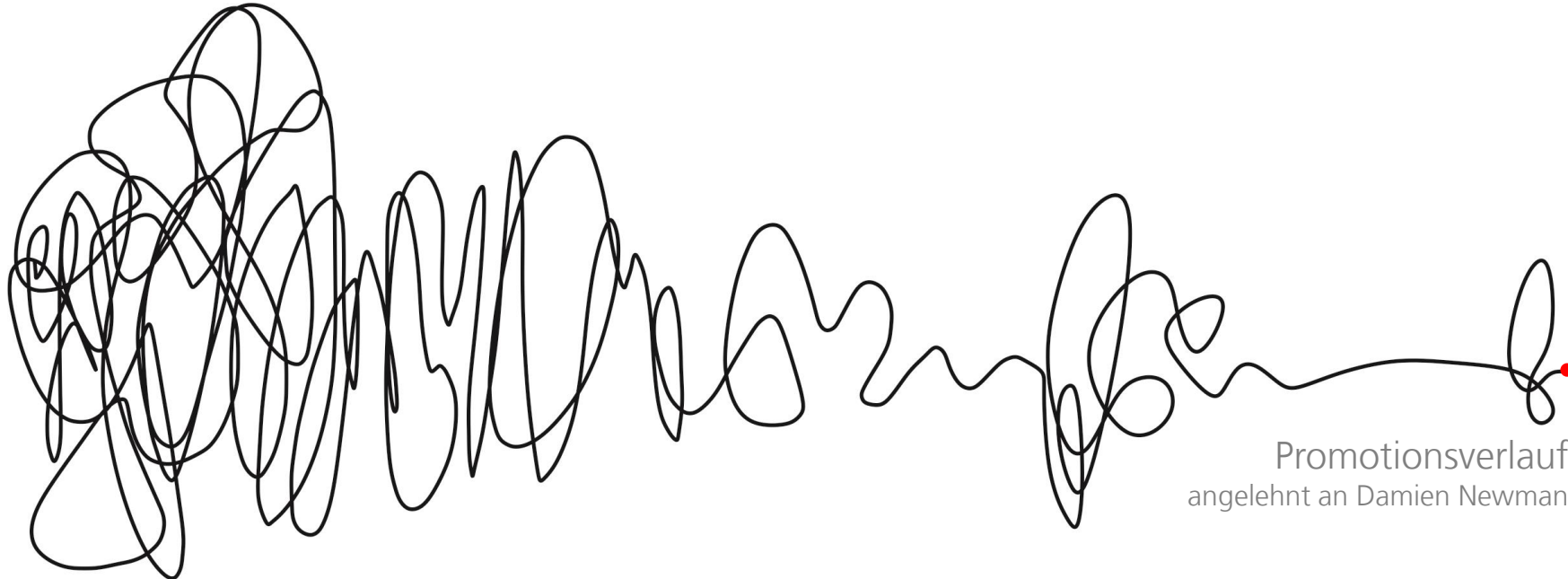
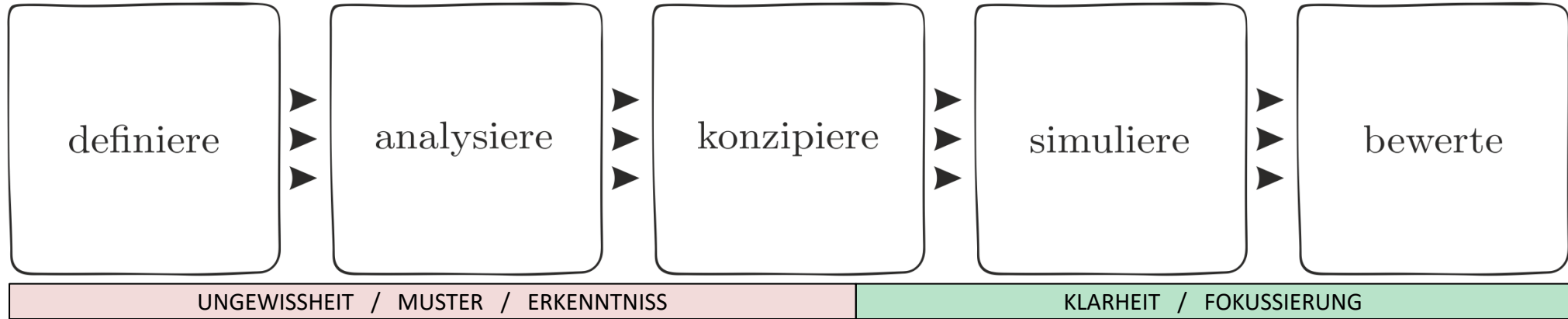


Zusammenfassung der Promotionstätigkeit



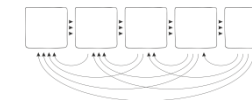


Zusammenfassung der Promotionstätigkeit

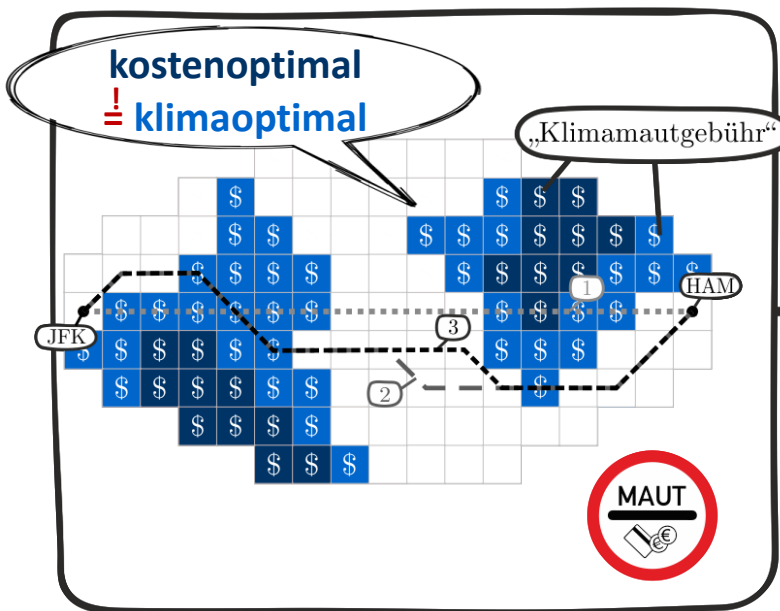


Promotionsverlauf
angelehnt an Damien Newman

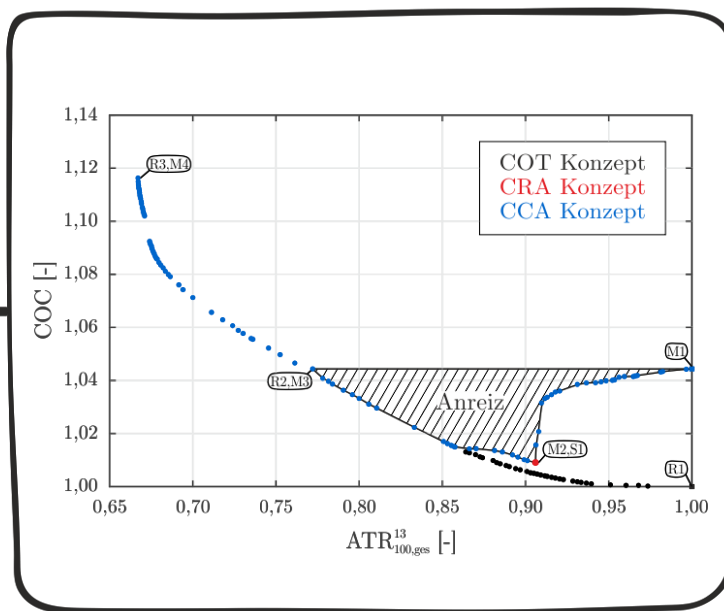




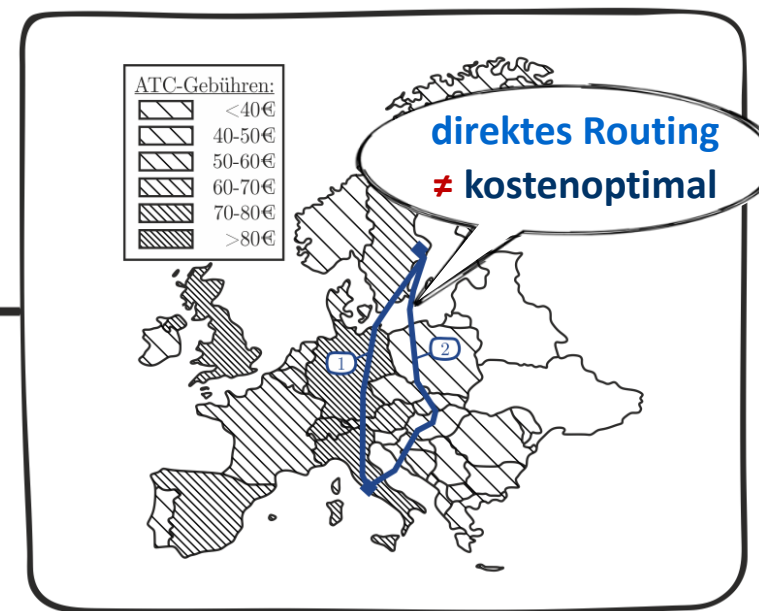
Ergebnis der Promotionstätigkeit



Neues Konzept entwickelt

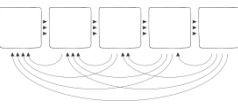


Funktionalität und Effektivität des Konzeptes nachgewiesen

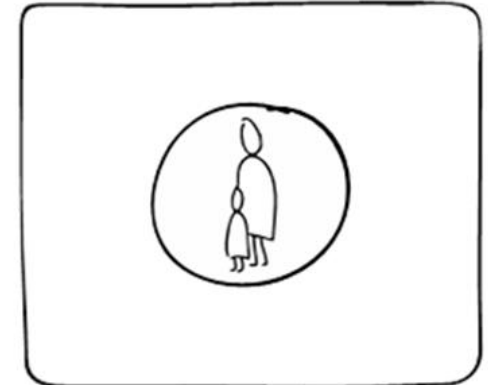
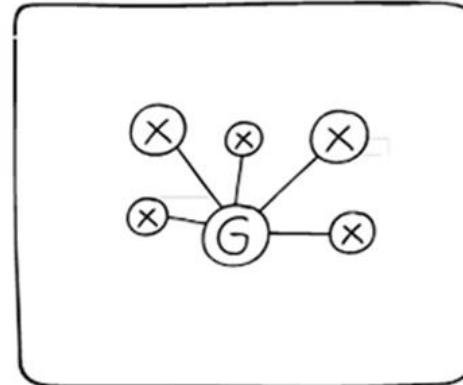
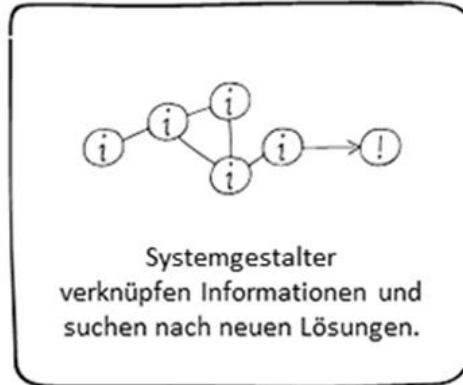
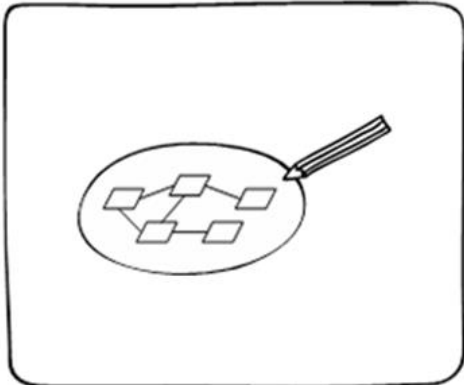
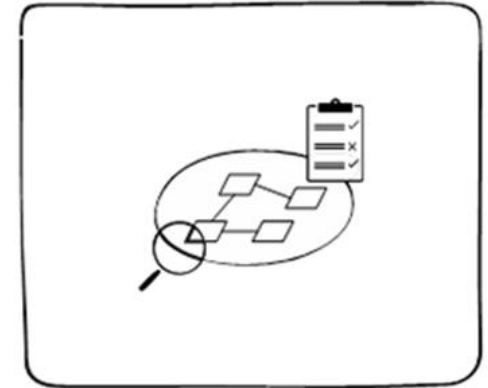
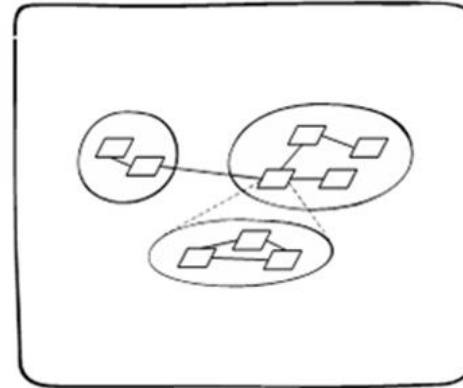
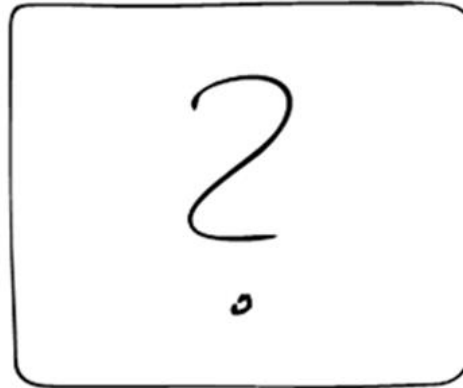
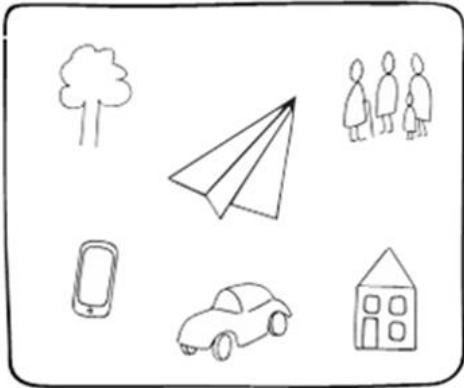


Praktikabilität des Konzeptes aufgezeigt





Fragen?



[GIF]



Anhang

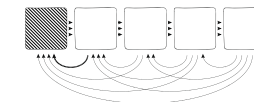


TUHH

TUDelft

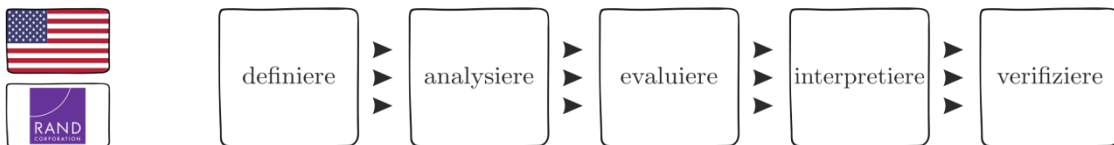


Wissen für Morgen



Gegenüberstellung von Ansätzen zur Analyse und Gestaltung von Systemen

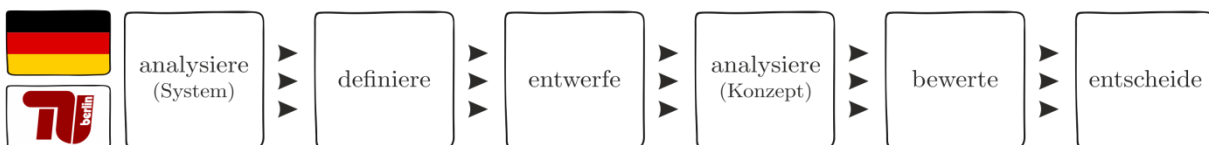
Quade und Boucher (1968, S.33)



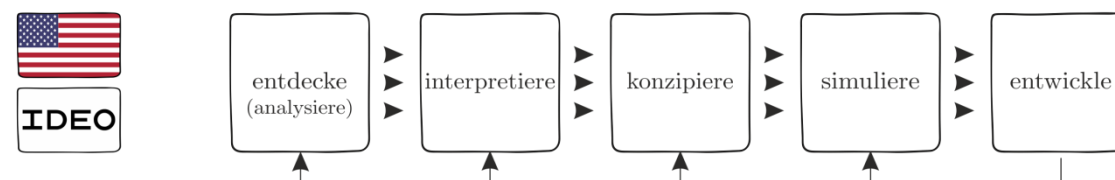
Lindemann (2009, S.51)



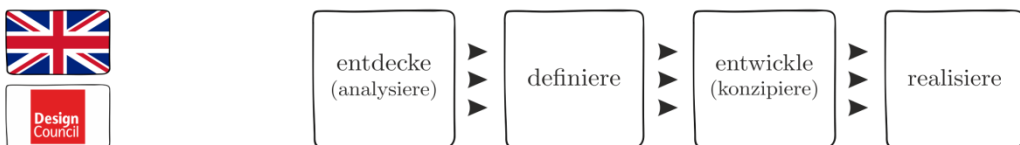
Zangenmeister (1971, S.29)



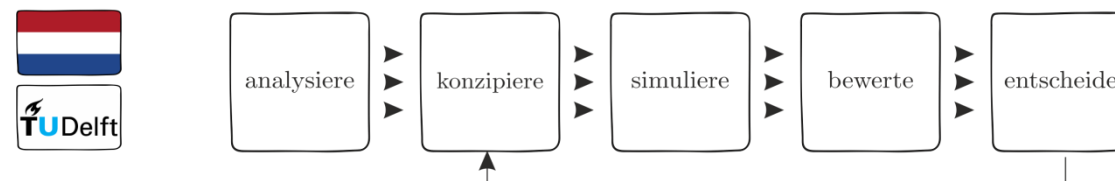
IDEO (2012, S.15)



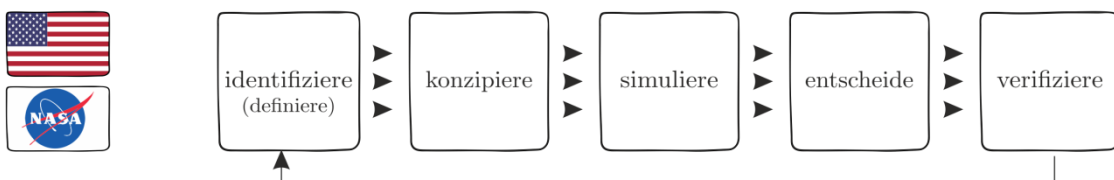
Design Council (2005, S.6-7)



van Boeijen et al. (2014, S.18)



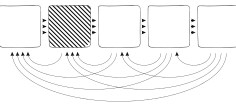
NASA (2007, S.56)



...

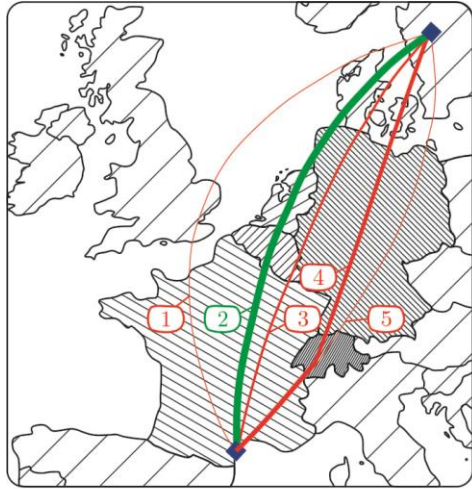
...





Praktikabilität eines preisbasierten Ansatzes in der Luftfahrt

Einfluss der Flugroutenführung auf die Gesamtbetriebskosten



Flugsicherungsgebühren	2012	2013	2014	2015
Belgien	74 €	68 €	72 €	71 €
Deutschland	74 €	77 €	77 €	90 €
Frankreich	65 €	65 €	66 €	70 €
Großbritannien	85 €	85 €	87 €	100 €
Niederlande	66 €	66 €	67 €	67 €
Schweiz	99 €	97 €	100 €	111 €
<u>Kerosinpreis (Gallonen)</u>	2.38 €	2.20 €	2.03 €	1.47 €

“If an airline chooses to fly a longer route around an expensive airspace, it’s relatively cheap these days, in terms of additional fuel burn, to do this.”



Flemming Nyrup (2016)
 Performance Manager at MUAC
 Eurocontrol

**Direkte Flugführung
 ≠ Kostenoptimal**

Prozentuale Verteilung des Verkehrsaufkommens		2012	2013	2014	2015	Gesamt
1	GB - Frankreich	4%	4%	4%	3%	-1%
2	Deutschland - Niederlande - Belgien - Frankreich	61%	64%	65%	70%	+9%
3	Deutschland - Belgien - Frankreich	14%	14%	13%	11%	-3%
4	Deutschland (MUAC) - Schweiz - Frankreich	17%	14%	12%	12%	-5%
5	Deutschland - Schweiz - Frankreich	3%	4%	3%	2%	-1%
Andere	Deutschland - Hannover - Belgien - Frankreich	1%	1%	2%	2%	+1%

Eurocontrol (2016)

