

**ILT**



Institut für  
Lufttransportsysteme

**TUHH**  
Technische  
Universität  
Hamburg



# Klimaoptimierter Hyperschall-Flugbetrieb auf Missions- und Flottenebene

DGLR-Workshop zum Thema Missionsführung, Bahnführung und Bahnplanung für innovative Luffahrtanwendungen

D. Bodmer<sup>1</sup> und V. Gollnick<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Lufttransportsysteme (ILT), Technische Universität Hamburg, Blohmstr. 20, 21079 Hamburg

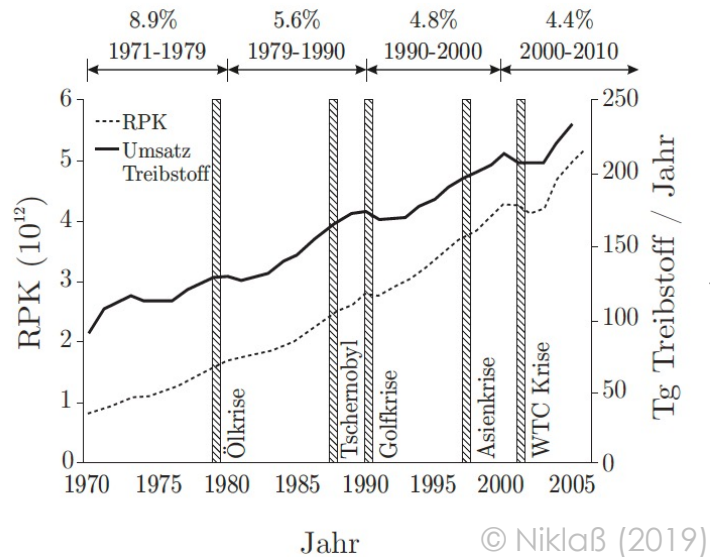
23.05-24.05.2023 - Airbus Defence and Space - 85077 Manching, Deutschland

## Vortragsübersicht

1. Motivation
2. Forschungsmethodik
3. Routenplanung und Flugprofilmodellierung
4. Trajektorienimulation
  - 4.1 Fluggerät
  - 4.2 Hypersonic Trajectory Calculation Module
  - 4.3 Differentialgleichungen der Flugkörperbewegung
5. Emissionsberechnung
6. Trajektorienoptimierung
  - 6.1 Lärmoptimale Flugtrajektorien
  - 6.2 Emissionsoptimale Flugtrajektorien
  - 6.3 Klimaoptimale Flugtrajektorien
7. Zusammenfassung

## Luftverkehr der Zukunft

### Aktuelles Luftverkehrswachstum



Das weltweite Passagieraufkommen verdoppelt sich im Schnitt alle 15 Jahre

### Technologische Maßnahmen

Steigerung des Transportvolumens

*Erhöhung der Passagieranzahl*

Steigerung der Transportfrequenz

*Erhöhung der Fluggeschwindigkeit*

Steigerung der Transportleistung

*Erhöhung der Flugzeuganzahl*

### Leitkonzepte (LK) der Zukunft

	Mach	Höhe	Reichweite
LK 1	2	17÷20 km	13 000 km
LK 2	5	28÷32 km	15 000 km
LK 3	8	30÷38 km	18 000 km
LK 4	12	45÷50 km	20 000 km

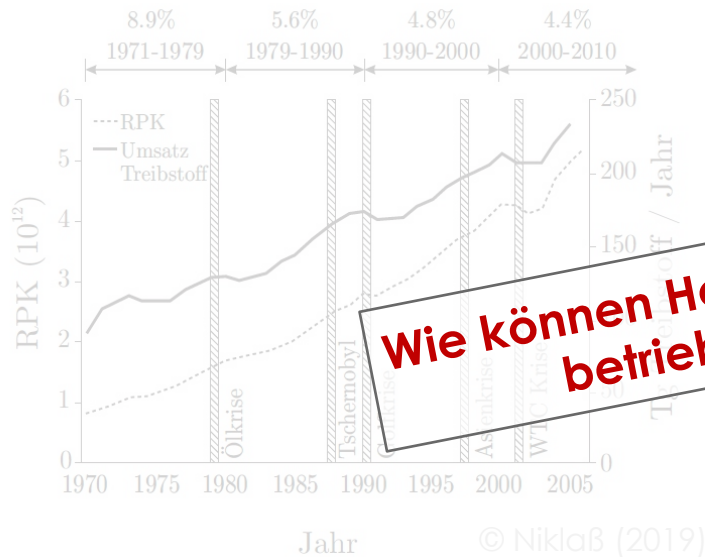
© Hirschel (1987)



STRATOFly-MR3  
2019

## Luftverkehr der Zukunft

Aktuelles Luftverkehrswachstum



Technologische Maßnahmen

Leitkonzepte (LK) der Zukunft

**Wie können Hochgeschwindigkeitsflugzeugkonzepte der Zukunft operationell betrieben werden, damit diese möglichst klimafreundlich sind?**

Steigerung des Transportvolumens  
Erhöhung der Transportfrequenz

Steigerung der Transportleistung  
Erhöhung der Fluggeschwindigkeit

Steigerung der Transportleistung  
Erhöhung der Flugzeuganzahl

	Höhe	Reichweite
LK 1	17+20 km	13 000 km
LK 2	28+32 km	15 000 km
LK 3	30+35 km	18 000 km
LK 4	45+50 km	20 000 km

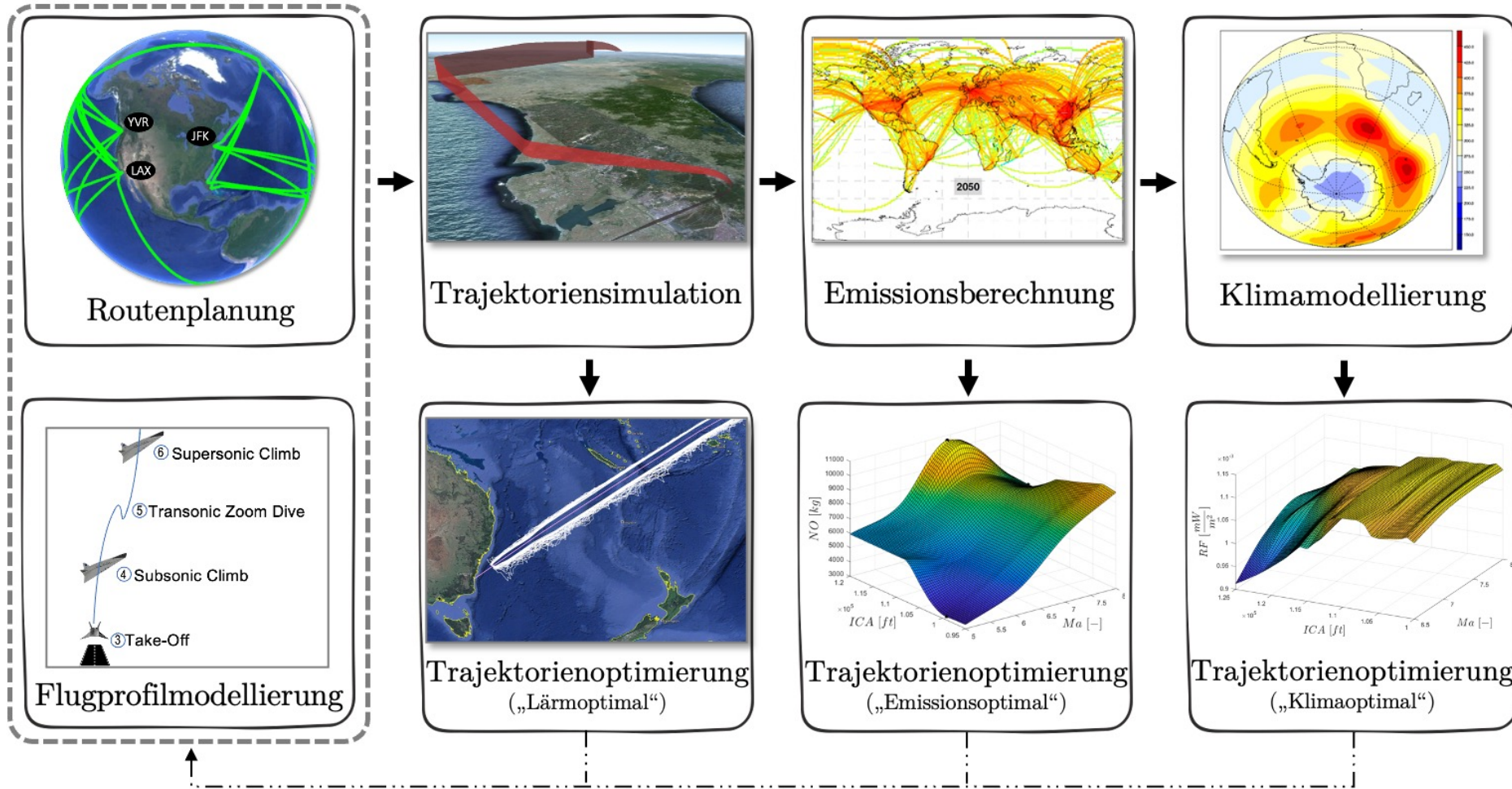
© Hirschel (1987)

Das weltweite Passagieraufkommen verdoppelt sich im Schnitt alle 15 Jahre

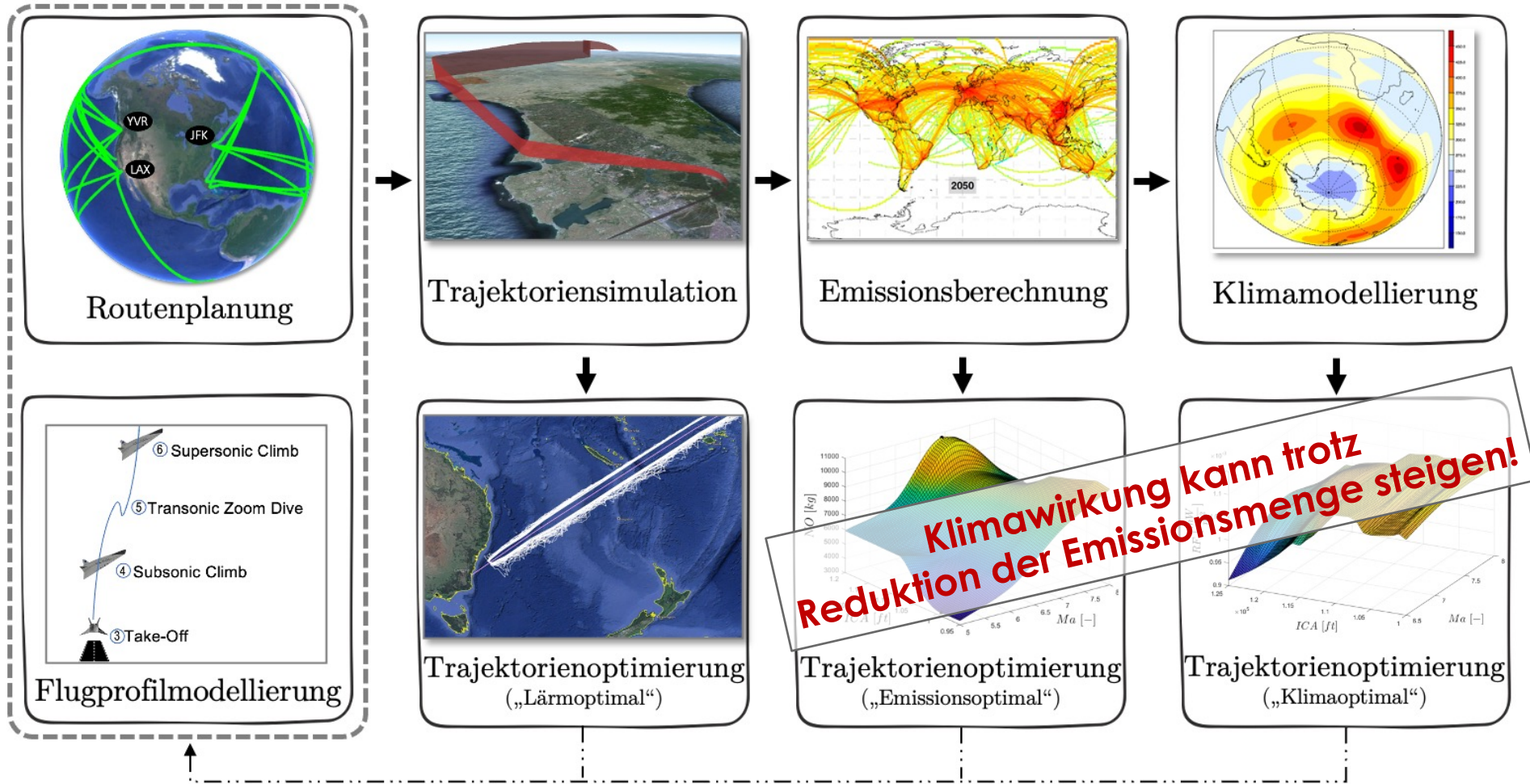


STRATOFly-MR3  
2019

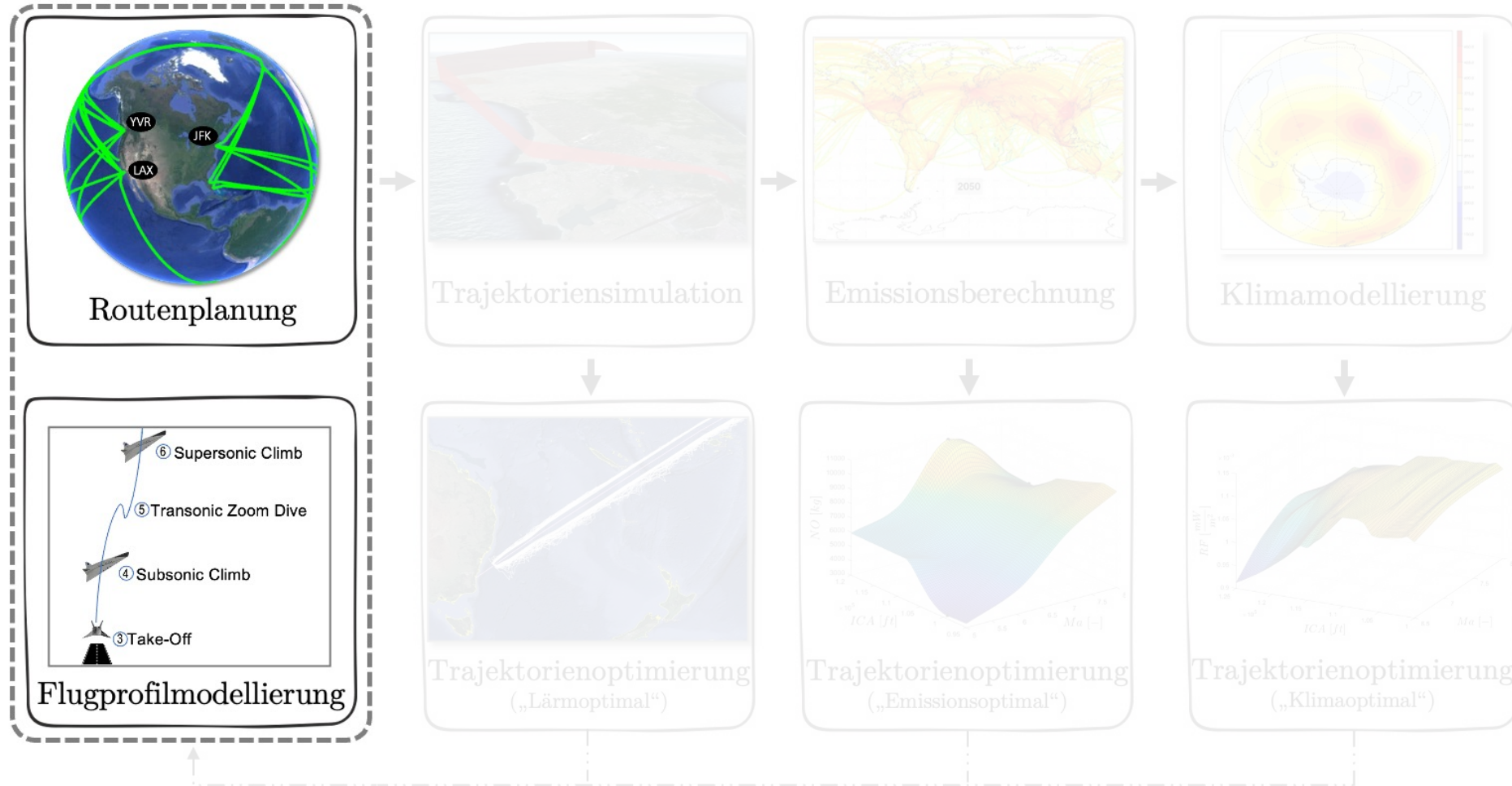
# Klimaoptimierter Hyperschall-Flugbetrieb



# Klimaoptimierter Hyperschall-Flugbetrieb



# Klimaoptimierter Hyperschall-Flugbetrieb



## 3.1 Routenplanung

- Missionsebene: **Auslegungsrouten** von Brüssel (BRU) nach Sydney (SYD)

Missionsspezifikationen	
Reichweite	18 710 km
Reisefluggeschwindigkeit	Mach 8
Reiseflughöhe*	105 000 ft (32 km)
Abfluggewicht (MTOW)	410 446 kg

- Flottenebene: **Flugverbindungen** sind abhängig vom **Business Case**

= f(Ticketpreis, Zeitvorteil, Komfort, ind. Akzeptanz, Zeitverschiebung, Biorhythmus, ...)

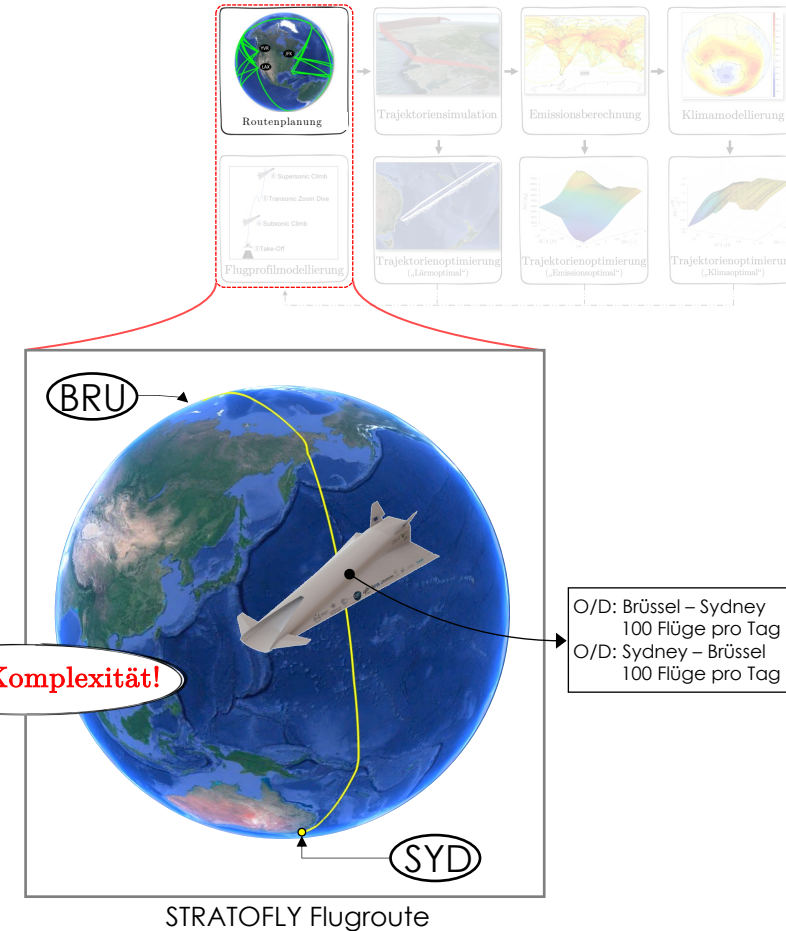


“In this context [...] a fleet of **200 hydrogen fueled hypersonic airliners** flying **once a day** for **360 days** from Brussels to Sydney [is investigated].”



*Antonella Ingenito (2018)*  
Professor at Sapienza University of Rome  
School of Aerospace Engineering

Anwendungsfall Flottenebene

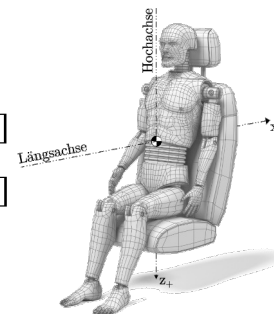
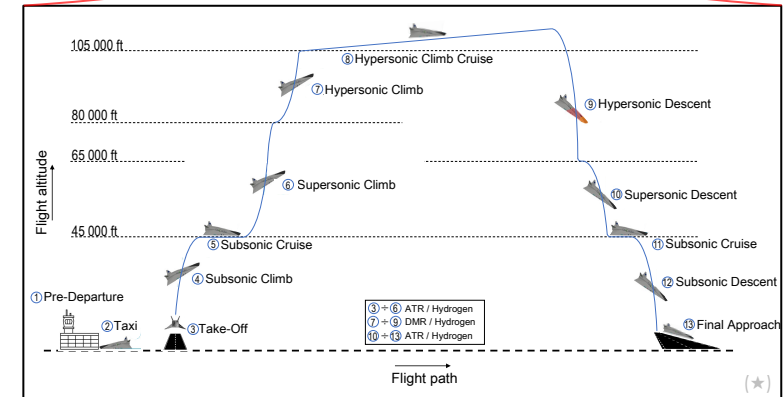
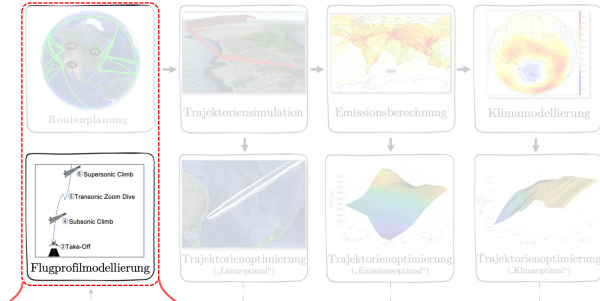


(★) geodätische Auslegungshöhe für Hyperschall-Missionsprofil



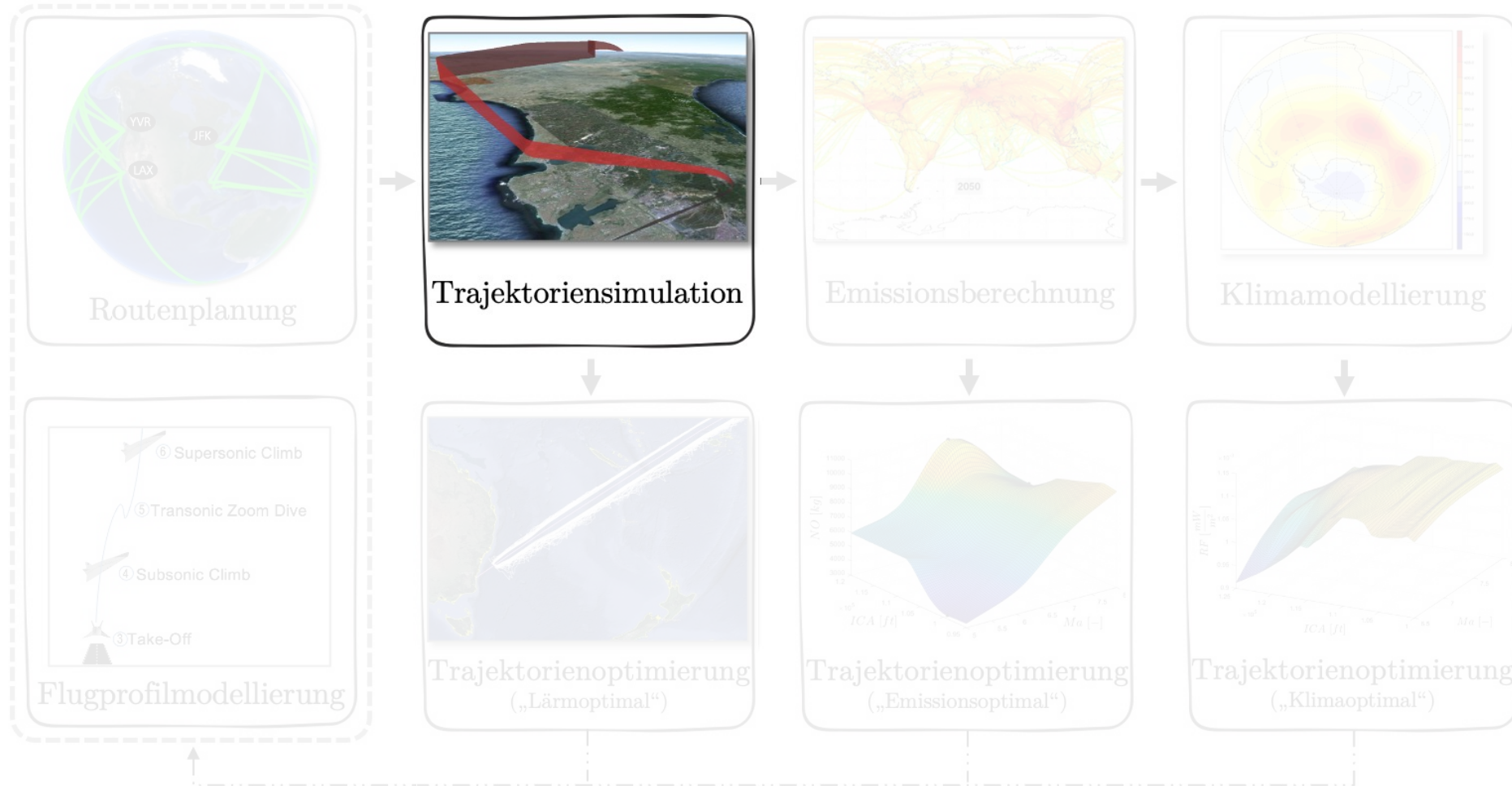
## 3.2 Flugprofilmodellierung

- Betrachtung des Flugverlaufs vom Abheben ③ bis zum Aufsetzen ⑬: „Trip Fuel“
- Anlehnung der Sollflugbahn an **Experimental Flight Management System** Systematik → Unterteilung des Vertikalflugprofils in Phasen mit Ziel- und Abbruchbedingungen („**Phasentabelle**“) © EUROCONTROL (1996)
- Identifikation von **27 Flugphasen**:
  - 3 Reiseflugphasen
  - 10 Steigphasen
  - 8 Sinkphasen
 Rest: Beschleunigungs- oder Entschleunigungsphasen
- Unterschall: Berücksichtigung von **ATC-Regularien**; z.B. Fluggeschwindigkeitsbegrenzung auf  $V_{Cas} = 250$  kts unterhalb FL 100)
- Hyperschall: Optimierung von Reiseflugphase über **Cruise Climb**
- Sicherstellung des **Passagierkomforts**: Lastfaktorbegrenzung
  - Entlang der Hochachse (Lotebene zur Bahngeschwindigkeit):  $n_z = [+0.88; +1.3]$
  - Entlang der Längsachse (kollinear zur Bahngeschwindigkeit):  $n_x = [-0.35; +0.4]$



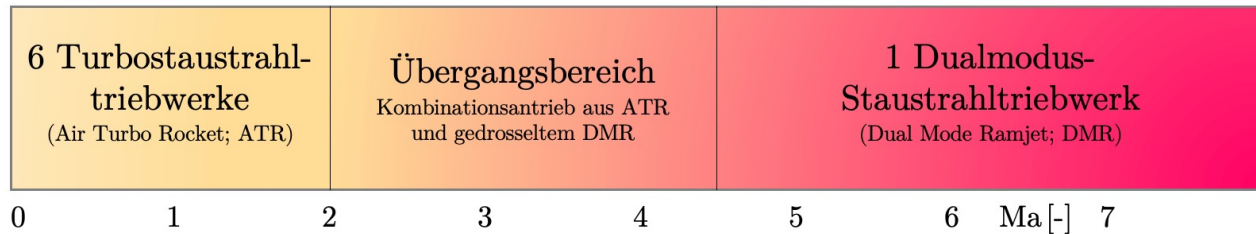
(★) Flugphasen nur symbolisch dargestellt; nicht vollständig

# Klimaoptimierter Hyperschall-Flugbetrieb

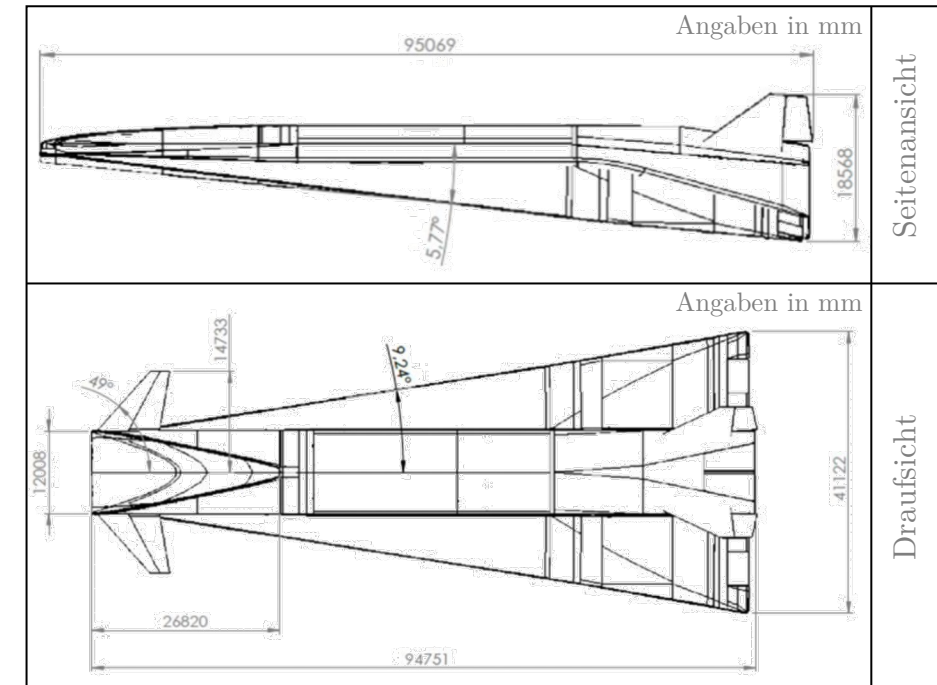
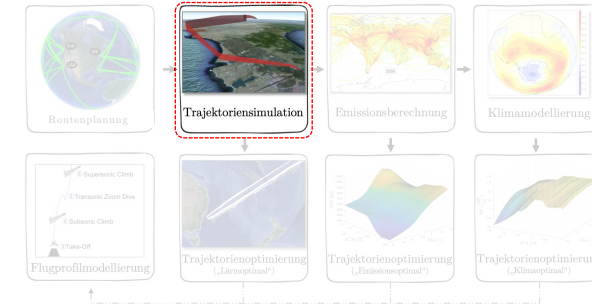
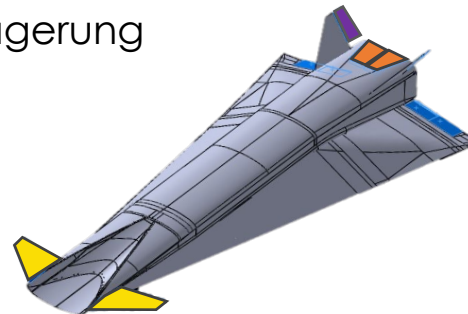


## 4.1 Fluggerät

- Hyperschall-Flugsystem in *Waverider*-Konfiguration *MR3*
- Turbo-Staustrahl-Kombinationsantrieb



- Flüssig-Wasserstoff (LH<sub>2</sub>) als Flugkraftstoff
- Integration von Antriebssystem in Flugzeugzelle  
→ Oberseite: Kombinationsantrieb; Unterseite: Passagierkabine (300 PAX)
- Integral-Blasentankkonzept zur kryogenen LH<sub>2</sub>-Lagerung
- Flugsteuerung:
  - 2 Canards
  - 4 Elevons (2 auf jeder Seite)
  - 2 Rumpfkappen
  - Doppeltes Seitenleitwerk



Abmessungen des Fluggeräts *MR3*

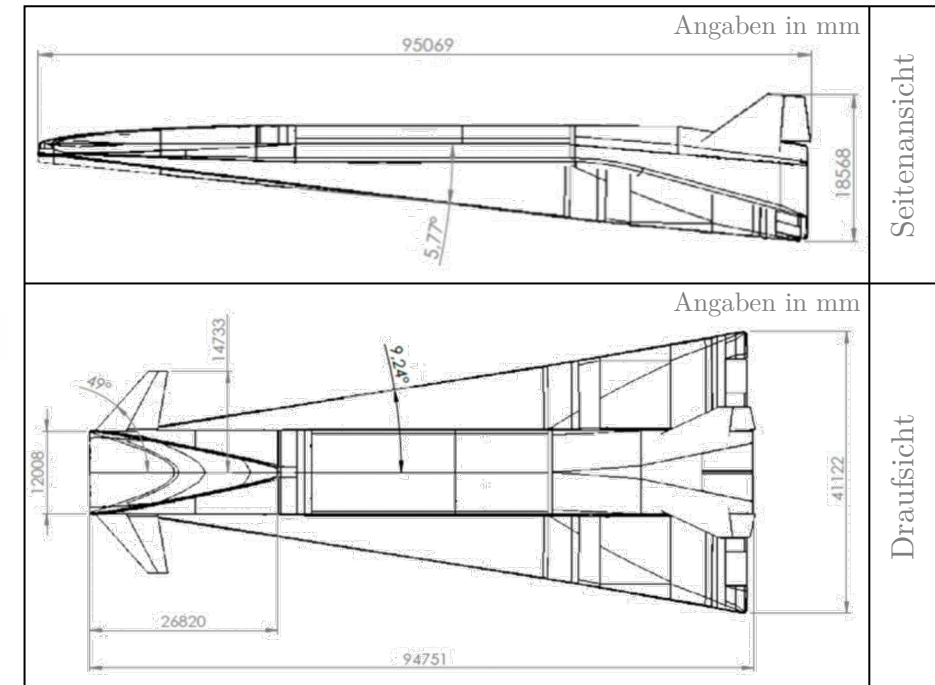
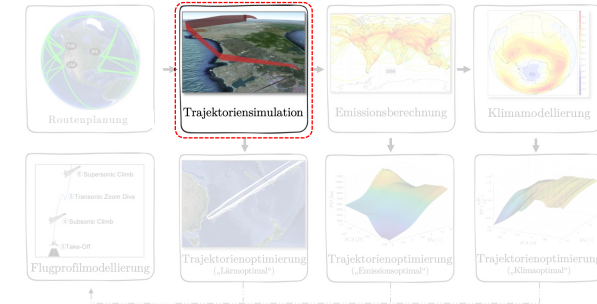
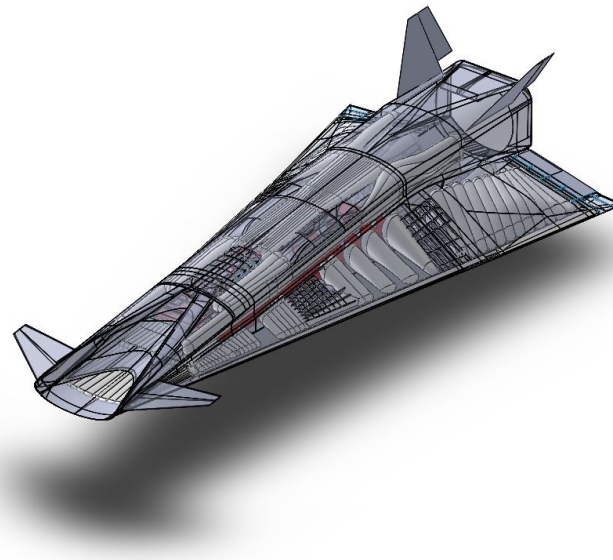
© Ferretto (2019)

## 4.1 Fluggerät

- Geometriedaten und Massenübersicht:

Baulänge	94.7 m
Flügelreferenzfläche	1365 m <sup>2</sup>
Leermasse	194836 kg
Besatzung/Ausrüstung	1360 kg
Betriebsleergewicht (OEW)	196196 kg
Treibstoffvolumen (LH <sub>2</sub> )	181250 kg
Konzipierte Nutzlast	33000 kg
Max. Abfluggewicht (MTOW)	410446 kg

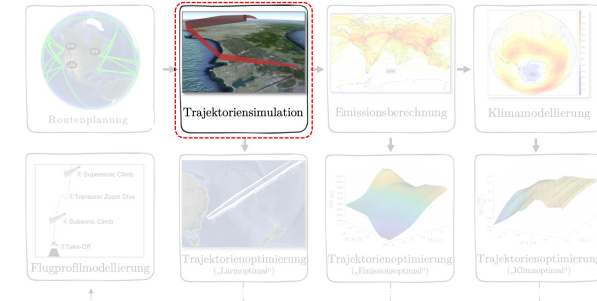
© Ferretto (2019)



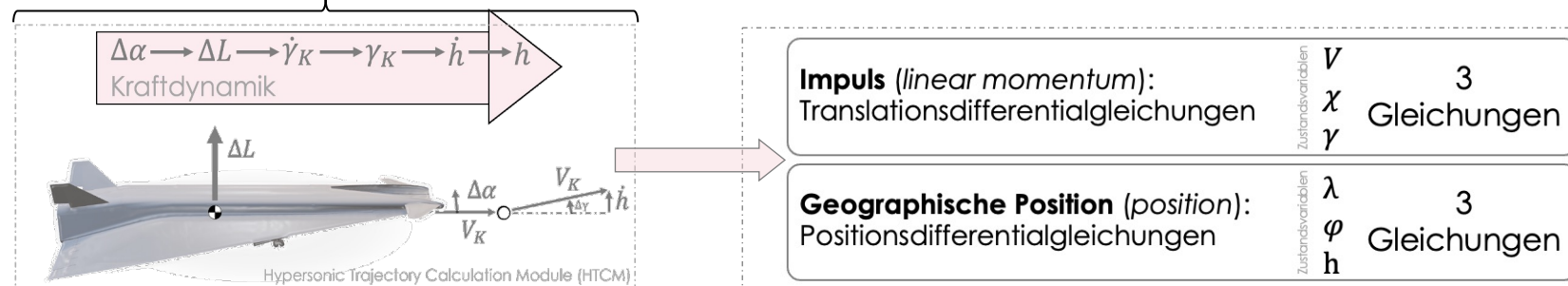
Abmessungen des Fluggeräts MR3

© Ferretto (2019)

## 4.2 Hypersonic Trajectory Calculation Module

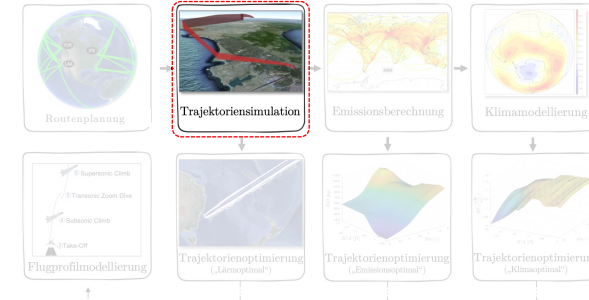


- Software-Derivate von **Trajectory Calculation Module** (TCM; DLR Hamburg) © Linke (2016)
- Erweitert/Adaptiert zur Berechnung von (realistischen) **hypersonischen 4D-Flugtrajektorien**
- Implementiert in **MATLAB**; flexible und modulare Forschungsumgebung
- Flugdynamik abgebildet als **Punktmassenmodell**



- Zustandsvariablen:  $V, \gamma, \chi, \lambda, \varphi, h$  Steuergrößen:  $\dot{V}_c, \dot{\gamma}_c / \dot{h}_c, \dot{\chi}_c, F_{TW}$
- **Adaptive** Euler-Vorwärts **Integrationsmethode**, die das Tool effizienter macht;  
→ Reduzierung der Integrationsschrittweite falls höhere Genauigkeit erforderlich ist (z. B. bei hypersonischen Phasenübergängen)
- Verwendung von **höherwertigen Flugleistungsdatensätzen** in tabellierter Form („*n-D Lookup-Tables*“)  
→ Triebwerksleistung (ATR: Ispir (2020); DMR: Saccone (2022)) sowie Aerodynamik (inklusive Stabilitäts- und Trimmanalyse: Viola (2021))
- Resultierende **4D-Trajektorie** enthält die **vollständigen** Satz an **Flugzuständen** einschließlich erweiterter Zustandsvariablen wie Lastfaktoren, Kurvenradius, Querneigungs- bzw. Hängewinkel etc.

## 4.3 Differentialgleichungen der Flugkörperbewegung



Guter Kompromiss für operationelle Analysen!

### Translationsdifferentialgleichungen

$$\dot{V} = + \frac{F_{TW} \cdot \cos(\alpha) - D}{m} - g \cdot \sin(\gamma) - (\omega_E)^2 \cdot (r_E + h) \cdot \cos(\varphi) [\cos(\chi) \cdot \cos(\gamma) \cdot \sin(\varphi) - \sin(\gamma) \cdot \cos(\varphi)]$$

$$\dot{\gamma} = + \frac{F_{TW} \cdot \sin(\alpha) + L}{m \cdot V} \cos(\mu) - \frac{g}{V} \cos(\gamma) + [\sin(\chi) \cdot \dot{\lambda} \cdot \cos(\varphi) + \cos(\chi) \cdot \dot{\varphi}] + 2 \cdot \omega_E \cdot \sin(\chi) \cdot \cos(\varphi) + \frac{(\omega_E)^2 \cdot (r_E + h)}{V} \cos(\varphi) [\sin(\gamma) \cdot \cos(\chi) \cdot \sin(\varphi) + \cos(\gamma) \cdot \cos(\varphi)]$$

$$\dot{\chi} = + \frac{F_{TW} \cdot \sin(\alpha) + L}{m \cdot V \cdot \cos(\gamma)} \sin(\mu) - [\tan(\gamma) \cdot \cos(\chi) \cdot \dot{\lambda} \cdot \cos(\varphi) - \tan(\gamma) \cdot \sin(\chi) \cdot \dot{\varphi} - \dot{\lambda} \cdot \sin(\varphi)] - 2 \cdot \omega_E [\tan(\gamma) \cdot \cos(\chi) \cdot \cos(\varphi) - \sin(\varphi)] + \frac{(\omega_E)^2 \cdot (r_E + h)}{V \cdot \cos(\gamma)} [\sin(\chi) \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi)]$$

Positions differentialgleichungen			Massenänderung
$\dot{\lambda} = V \frac{\sin(\chi) \cdot \cos(\gamma)}{(r_E + h) \cdot \cos(\varphi)}$	$\dot{\varphi} = V \frac{\cos(\chi) \cdot \cos(\gamma)}{(r_E + h)}$	$\dot{h} = V \cdot \sin(\gamma)$	$\dot{m} = -\dot{m}_{FF}(Ma, h, \delta_{TW})$

Auftriebsgleichung	
$C_L = \frac{2}{\rho \cdot V^2 \cdot S \cdot \cos(\mu)} [mg - F_{TW} \sin(\alpha) \cos(\mu) - m \cdot V [\sin(\chi) \dot{\lambda} \cos(\varphi) + \cos(\chi) \dot{\varphi}] - 2 \cdot m \cdot \omega_E \cdot \cos(\varphi) \cdot V \cdot \sin(\chi) - m \cdot (\omega_E)^2 (r_E + h) \cdot \cos^2(\varphi)]$	$\alpha = f(C_L, Ma)$

Widerstandsgleichung			Schwerpunktsänderung
$C_{D,trim} = f(C_L, Ma)$	$\delta_{Canards} = f(C_L, Ma)$	$\delta_{Elevons} = f(C_L, Ma)$	$CoG = f(C_L, Ma)$
$C_{D,\mu} = f(\Delta C_L, Ma, \mu)$	$\delta_{BodyFL} = f(C_L, Ma)$	$\delta_{Rudders} = f(\Delta C_L, Ma, \mu)$	

### Annahmen

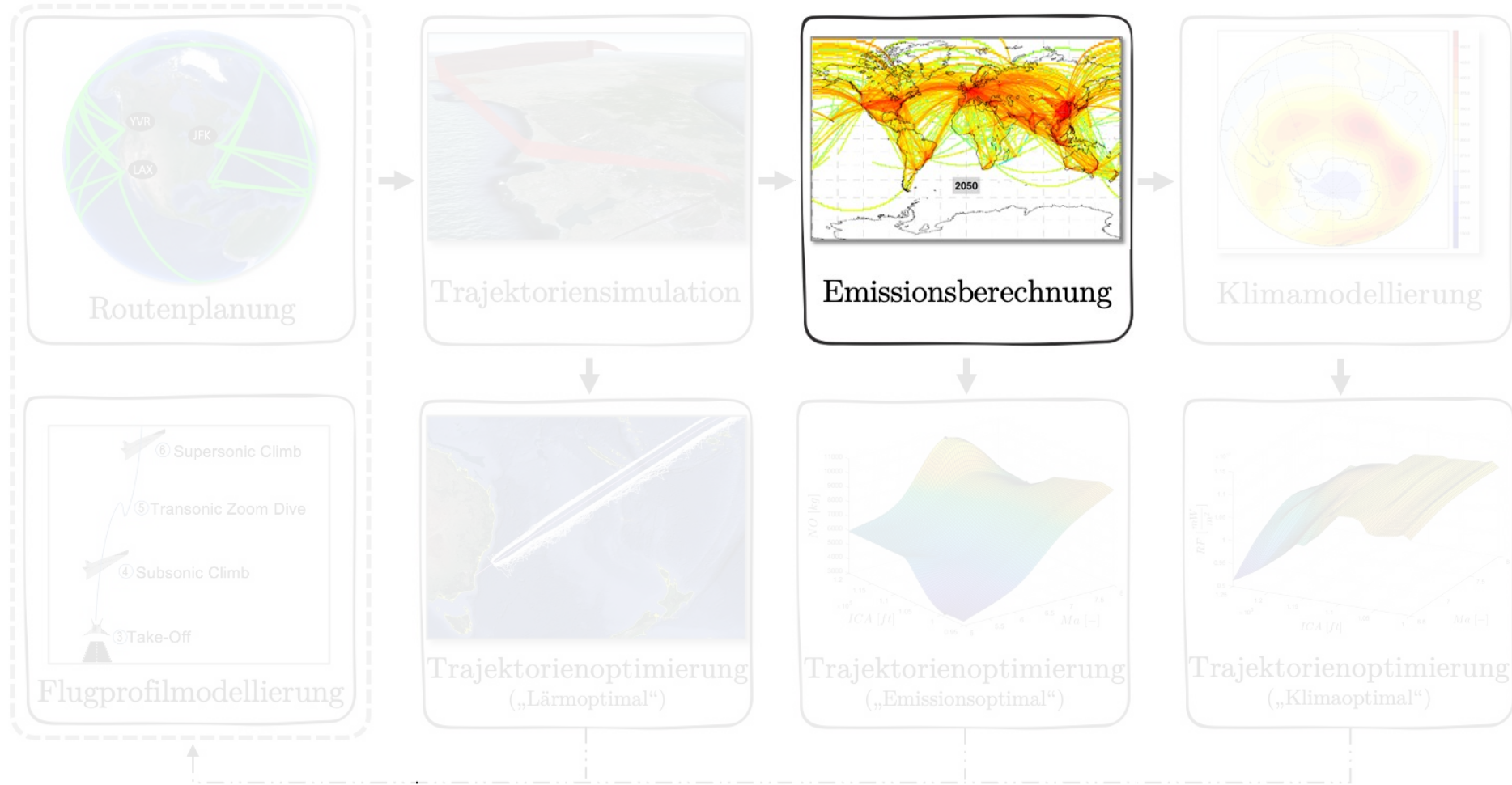
- Quasistationäre Masse zur Herleitung der BWGLs
- Runde Erde  $r_E = 6356766 \text{ m}$  © ISO 2533 (1979)
- Erdrotation  $\omega_E = 2\pi / (24 \text{ h})$  ist näherungsweise konstant
- Referenzpunkt (R), Schwerpunkt (G) und aerodyn. Bezugspunkt (A) sind kongruent
- Standardatmosphäre (kein Wind) © ISO 2533 (1979)
- 1D Gravitationsmodell: © ISO 2533 (1979)

$$g = g_0 \cdot \left(\frac{r_E}{r_E + h}\right)^2$$

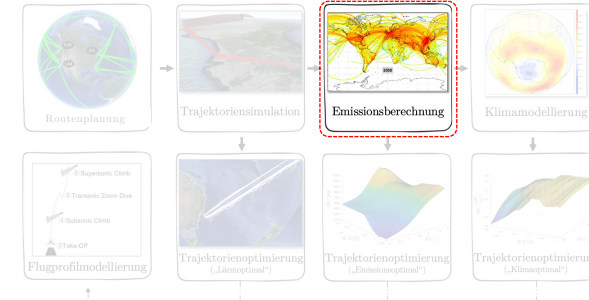
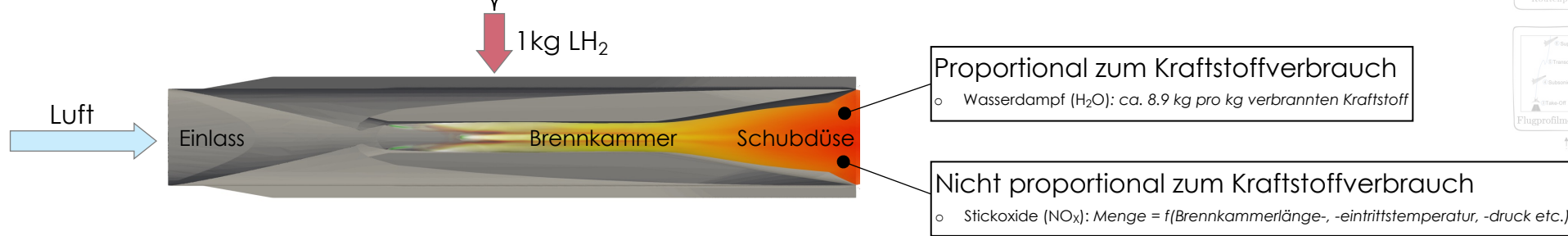
mit  $g_0 = 9.80665 \frac{m}{s^2}$  (kugelförmige Erde mit homogener Massenverteilung)

Vereinfachte Modellannahmen bieten dennoch eine hohe Ergebnissenauigkeit und werden im Rahmen der konsekutiven Klimaforschung/-wirkung wird als legitim angesehen!

# Klimaoptimierter Hyperschall-Flugbetrieb



- Verbrennung von **Luft** und **Flüssigwasserstoff** (LH<sub>2</sub>) zur Schubgenerierung



- Fokus auf klimawirksamsten Spurenstoffe für Optimierung → **Stickstoffmonoxid (NO)**- und **Wasserdampf (H<sub>2</sub>O)**-Emissionen
- Verwendung von **höherwertigen Emissionsdatensätzen** in Form von tabellierten **Emissionsindizes** (EI) der jeweiligen Spezies (i):

$$EI_i = 1000 \frac{m_i^*}{m_{H_2, injiziert} - m_{H_2}} \left[ \frac{g_i}{kg_{BF(\star)}} \right] \quad \text{© Saccone (2022)}$$

- Ermittlung der **Emissionsmassenströme**  $\dot{m}_i$  über das **Kraftstoffverbrauchsprofil**  $\dot{m}_{FF}$ :

$$\dot{m}_i = \dot{m}_{FF} \cdot EI_i(Ma, h) \left[ \frac{g_i}{s} \right]$$

- Berechnung die entlang der Trajektorie freigesetzten **Triebwerksemissionen**  $m_i$ :

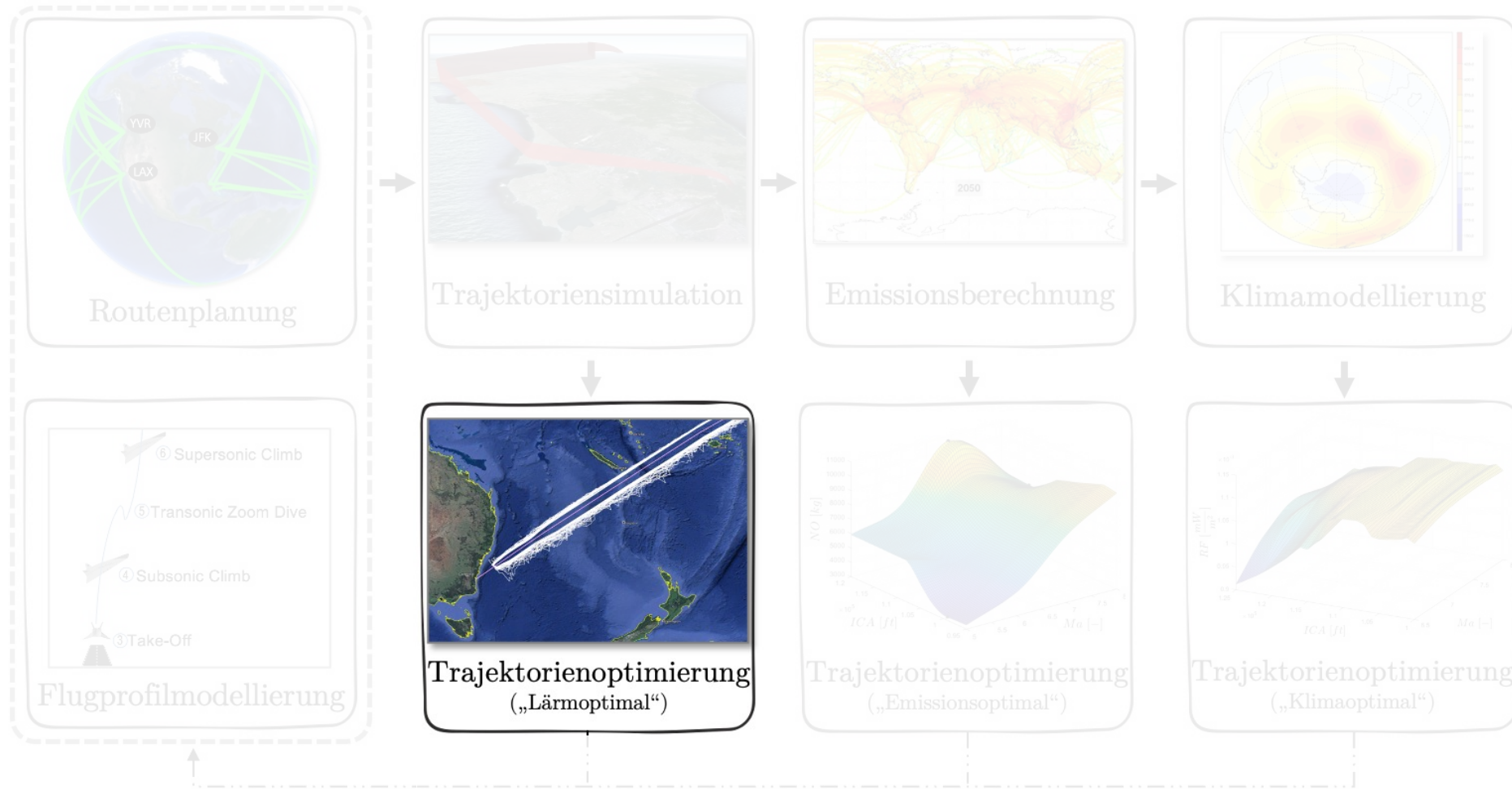
$$m_i = \sum_{t_0}^{t_e} (\dot{m}_i \cdot \Delta t) [g_i]$$

- Zustandsvariablen für Emissionsmassen:  $m_i$  für  $i \in \{H_2O, NO, H_2\}$

(★) Verbrannter Kraftstoff (engl. burned fuel: BF)



# Klimaoptimierter Hyperschall-Flugbetrieb



## 6.1 Lärmoptimale Flugtrajektorien (2D-Lateral)

- Berechnung des **geometrischen Überschall-Knallteppichs** ( $Mach > 1$ )
- Software: ✓ Entwickelt von **Bernd Liebhardt** (Institut für Luftverkehr, DLR Hamburg)
  - ✓ Modellierung der Schallausbreitung über **Sonic Ray Tracing** Methode
  - ✓ Verwendung von Realatmosphäre (ECMWF-Wetterdaten) inkl. Wind

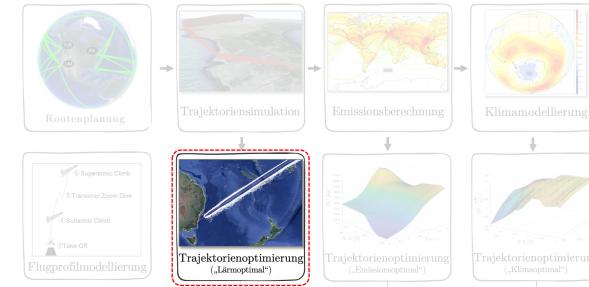
Eingabedaten:  $\underbrace{\lambda, \varphi, h^{(\star)}}_{\text{Position}} \quad \underbrace{Ma}_{\text{Geschwindigkeit}} \quad \underbrace{\chi, \gamma, \mu}_{\text{Lage}}$

Ausgabedaten:  $\underbrace{\lambda_{SB}, \varphi_{SB}}_{\text{Position}}$

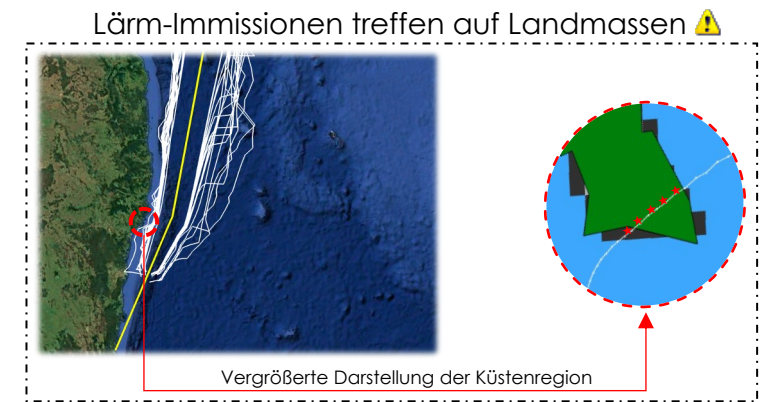
Steuergröße für Optimierungsalgorithmus: **Laterale Wegpunktkoordinaten**  $\lambda, \varphi$

- Vorgehen:
1. Berechnung von 4D-Flugtrajektorie
  2. Berechnung von Knallteppich
  3. Identifizierung von Lärm-Immissionen in Küstenregionen
  4. Anpassung der lateralen Navigation

Ziel: Lärm-Immissionen treffen nicht auf Landmassen und verlaufen nah zu Küstenregionen



© Liebhardt (2019)



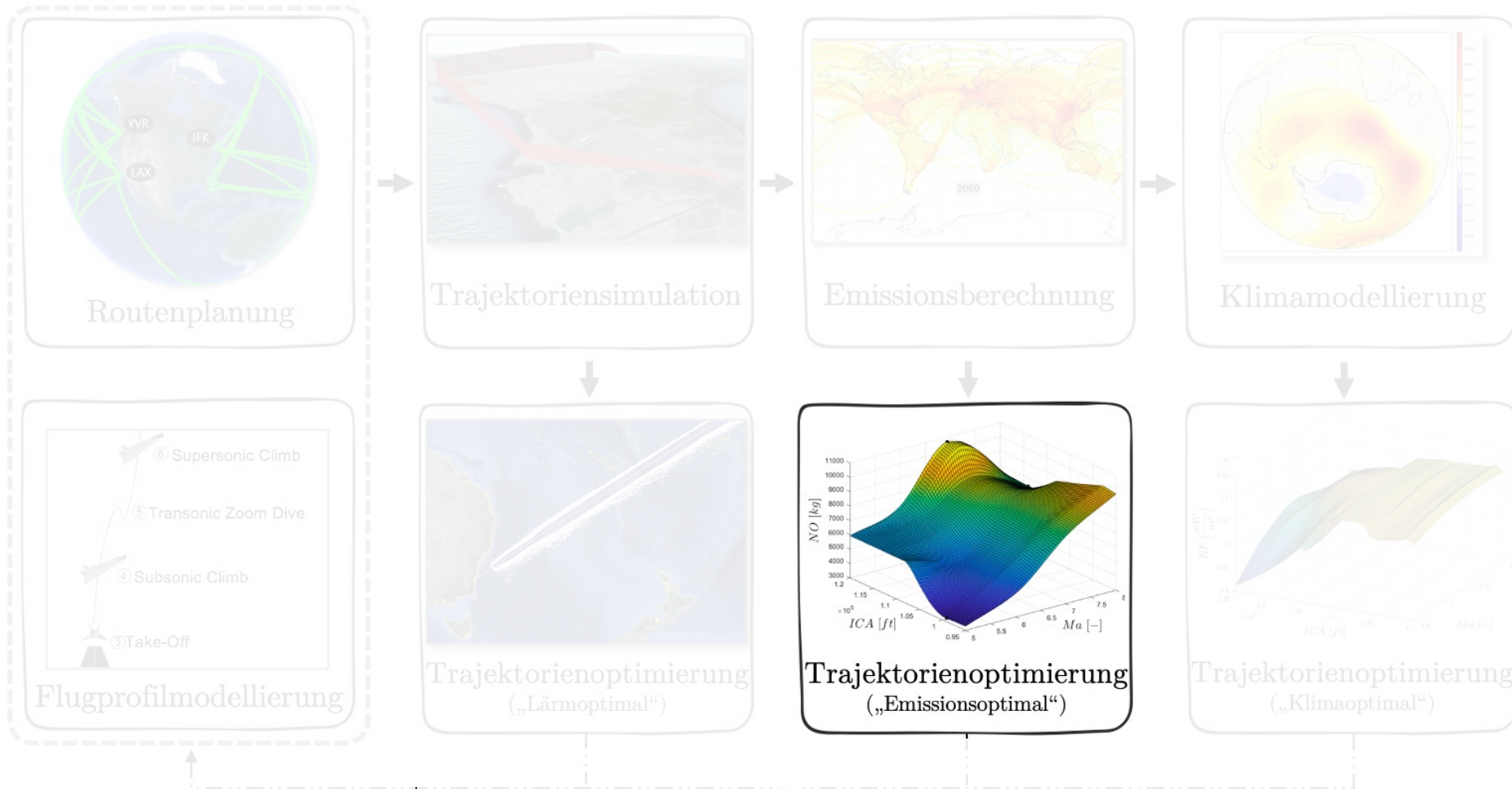
Technische Details

○ Max. <b>Breite</b> (Mach 8; 95 000 ft; ISA):	146 382 m
○ Max. <b>Breite</b> (Mach 8; 95 000 ft; ECMWF):	377 496 m

= **Lärmoptimal**

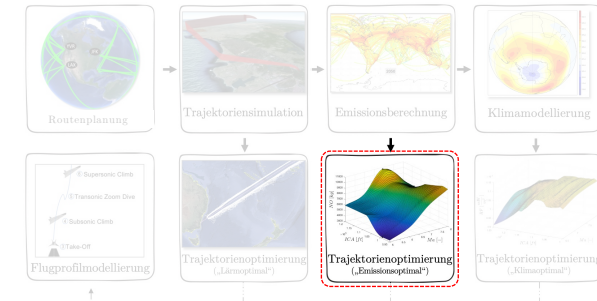
$h^{(\star)} = 95\,000\text{ ft}$  (konservative Betrachtung)

# Klimaoptimierter Hyperschall-Flugbetrieb



## 6.2 Emissionsoptimale Flugtrajektorien (1D-Vertikal)

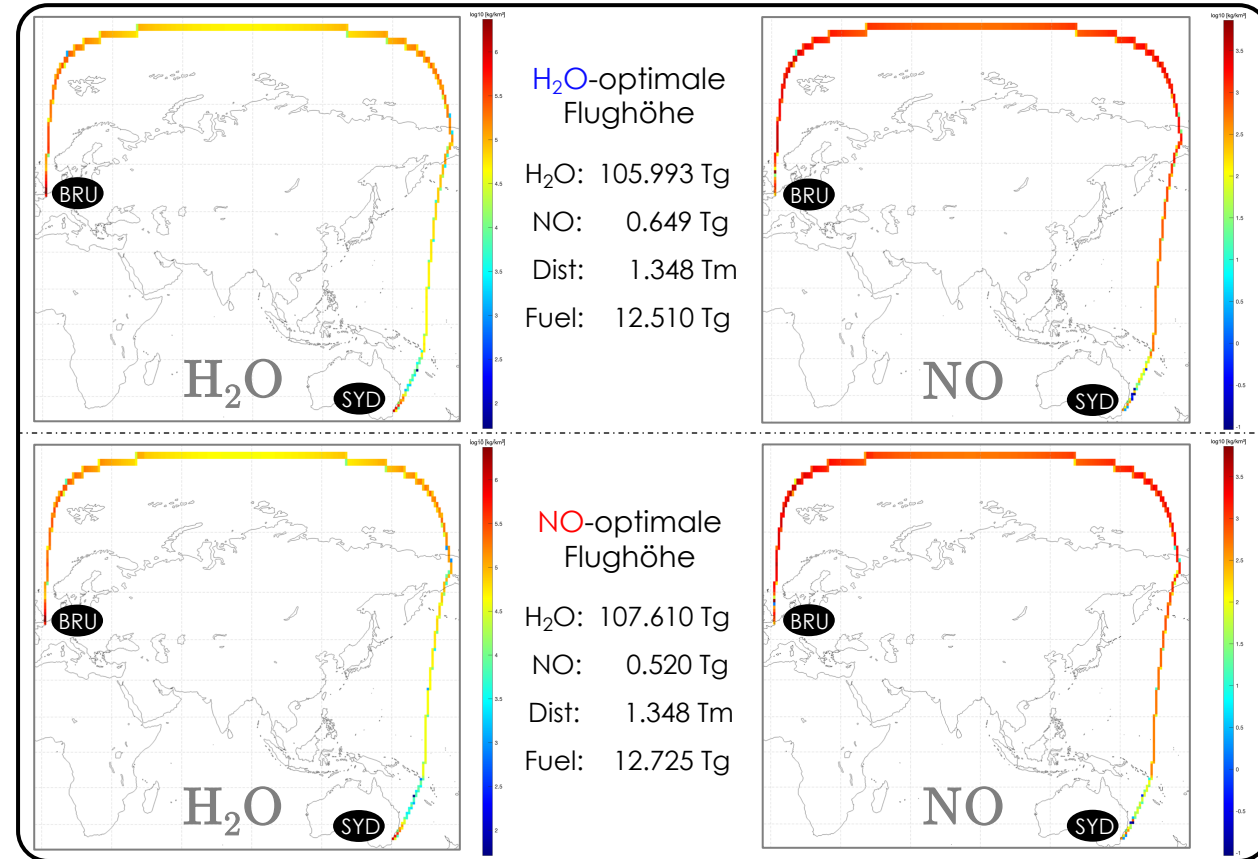
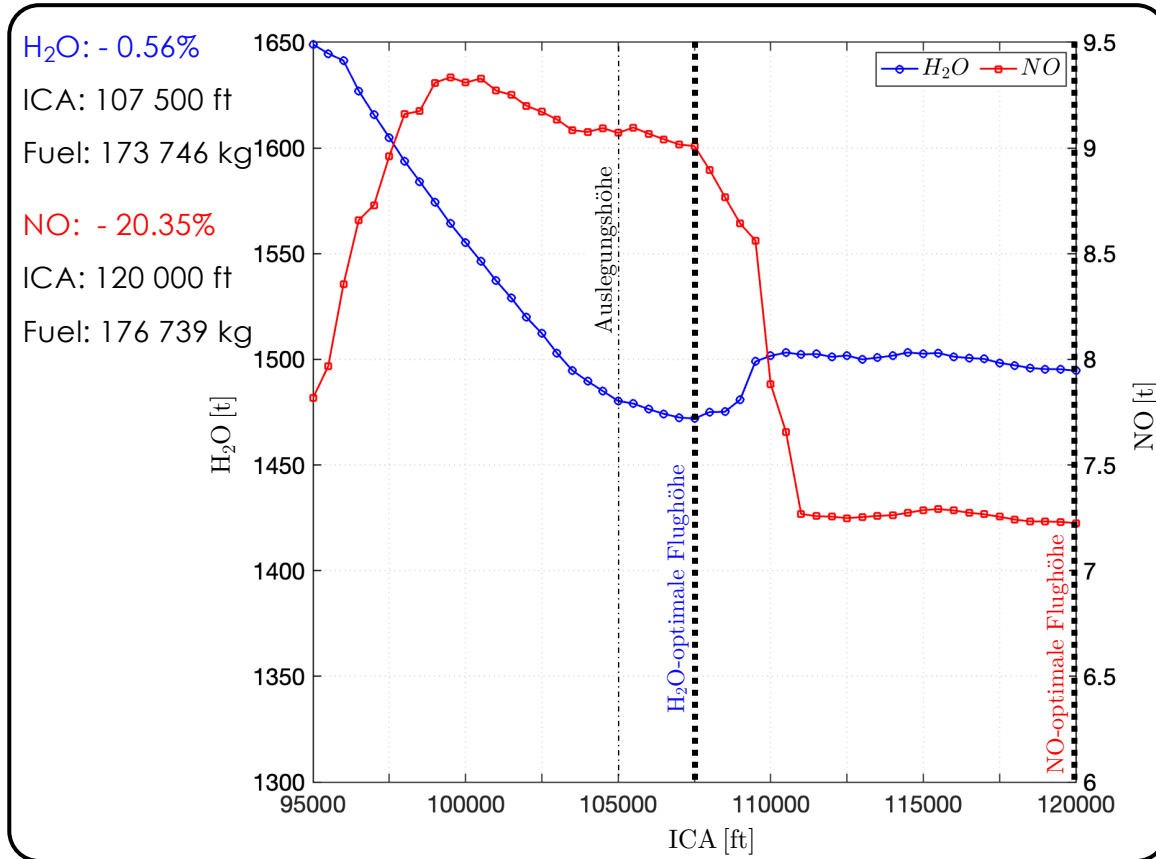
- Ziel: Identifikation von **H<sub>2</sub>O-/NO-optimalen** Trajektorien  
→ Trajektorien weisen hinsichtlich des Optimierungskriteriums die **kleinste H<sub>2</sub>O-/NO-Emissionsmenge** auf
- Ansatz: “**Brute-Force**“-Suche  
→ Betrachtetes Höhenintervall:  $h \in [95\,000\text{ ft}; 120\,000\text{ ft}]$   
→ Inkrementelle Suchschrittweite: 500 ft
- Steuergröße für Brute-Force-Suche ist **anfängliche Reiseflughöhe** (engl. initial cruise altitude; ICA)
- Ziel: Minimierung des **Kostenfunktional**  $J_i = \sum_{t_0}^{t_e} (\dot{m}_i(\lambda, \varphi, h) \cdot \Delta t)$  mit  $i \in \{H_2O, NO\}$



## 6.2 Emissionsoptimale Flugtrajektorien (1D-Vertikal)

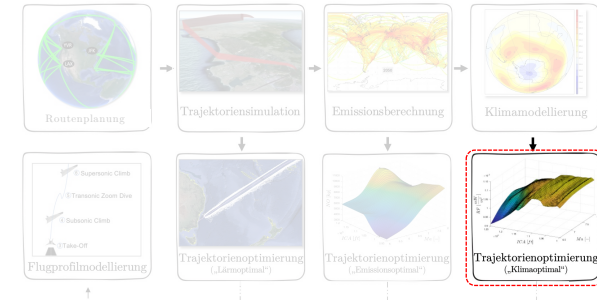
H<sub>2</sub>O/NO-optimale Trajektorien: **Missionsebene**

H<sub>2</sub>O/NO-optimale Trajektorien: **Flottenebene**



## 6.3 Klimaaoptimale Flugtrajektorien

Veränderung der  
**Strahlungsbilanz** der Erde aufgrund  
**Konzentrationsänderungen** von **Spurenstoffen**  
in der Atmosphäre



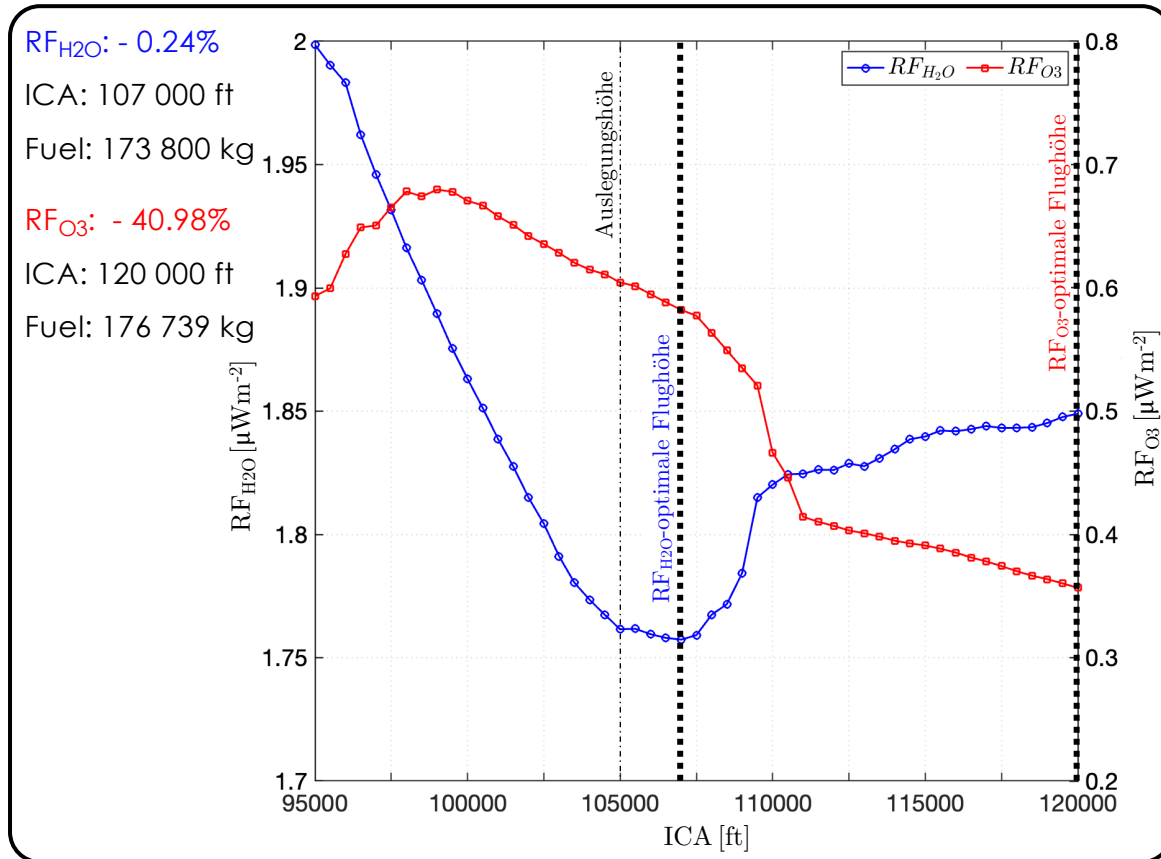
- Bewertungsmetrik: **Strahlungsantrieb** (engl. Radiative Forcing; RF)
  - Wasserdampfemissionen ( $\text{H}_2\text{O}$ ): Direkte Änderung der Strahlungsbilanz
  - Stickoxidemissionen ( $\text{NO}_x$ ): Indirekte Änderung der Strahlungsbilanz über **Ozon ( $\text{O}_3$ )** und Methan ( $\text{CH}_4$ ; statistisch nicht signifikant)
- Interpretation: Positiver RF → „wärmender“ Effekt; negativer RF → „kühlender“ Effekt
- Software: Entwickelt von **Johannes Pletzer** (Institut für Physik der Atmosphäre, DLR Oberpfaffenhofen) © Pletzer & Grewe (2023)
- Eingabedaten:
 

$\varphi, h$	$m_{\text{H}_2\text{O}}, m_{\text{NO}}, m_{\text{H}_2}$
⏟	⏟
Position	Emissionszustände
- Ausgabedaten:
 

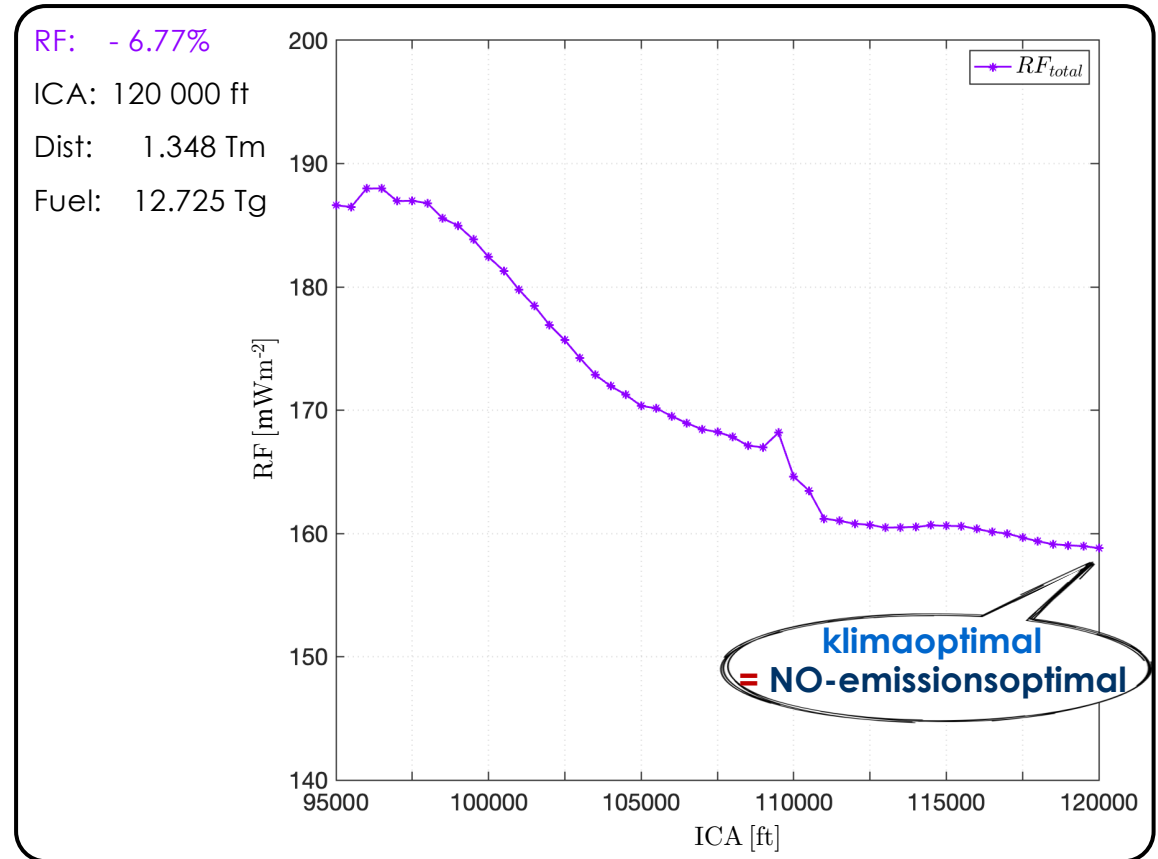
$\text{RF}_{\text{H}_2\text{O}}, \text{RF}_{\text{O}_3}, \text{RF}_{\text{total}}$
⏟
Klimametrik
- Ansatz: “**Brute-Force**“-Suche
  - Betrachtetes Höhenintervall:  $h \in [95\,000 \text{ ft}; 120\,000 \text{ ft}]$
  - Inkrementelle Suchschrittweite: 500 ft
- Steuergröße für Optimierungsalgorithmus ist **anfängliche Reiseflughöhe** (ICA)
- Ziel: Minimierung des **Klimametrik**:  $\text{RF}(\varphi, h, m_{\text{H}_2\text{O}}, m_{\text{NO}}, m_{\text{H}_2})$

## 6.3 Klimaoptimale Flugtrajektorien (1D-Vertikal)

RF<sub>H2O</sub>-/RF<sub>O3</sub>-optimale Trajektorien: Missionsebene



RF-optimale Trajektorien: Flottenebene



**Wie können Hochgeschwindigkeitsflugzeugkonzepte der Zukunft operationell betrieben werden, damit diese möglichst klimafreundlich sind?**



**Für eine Steigerung der (Flotten-)Reiseflughöhe von 105 000 ft (32 km) auf 120 000 ft (36,5 km) kann die Klimawirkung (gemessen im Strahlungsantrieb) von  $170,35 \text{ mWm}^{-2}$  auf  $158,81 \text{ mWm}^{-2}$  gesenkt werden. Dies entspricht einem Delta von  $\Delta \text{RF} = -6.77\%$**



Untersuchtes Flugzeugkonzept: STRATOFly-MR3



# ANHANG

## Literaturverzeichnis

- Airbus (2021) Global Market Forecast 2021–2040.
- EUROCONTROL (1996) PHARE: EFMS Phase 1B – Technical Reference Document. DOC 96-70-15, EFMS Integration Team, Brüssel, Belgien, 1996.
- Ferretto (2019) STRATOFly WP2.1 final report. Technischer Bericht GA-769246, Politecnico di Torino (POLITO), Turin, Italien, September 2019.
- Hirschel (1987) Aerothermodynamik von Überschallflugzeugen. Technischer Bericht MBB/LKE112/HYPAC/1/A, MBB, München/Ottobrunn, Deutschland, März 1987.
- Ingenito (2018) Impact of hydrogen fueled hypersonic airliners on the O3 layer depletion, International Journal of Hydrogen Energy, 43(50):22694-22704. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.208>, 2018.
- ISO 2533 (1979) Normatmosphäre. <https://dx.doi.org/10.31030/1339377>. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- Ispir (2020) Thermodynamic efficiency analysis and investigation of exergetic effectiveness of STRATOFly aircraft propulsion plant. In Proceedings of AIAA Scitech 2020 Forum, Seite 1-10. Orlando, Florida, USA, 2020. <https://doi.org/10.2514/6.2020-1108>.
- Liebhardt (2019) Sonic Boom Carpet Computation as a Basis for Supersonic Flight Routing. In AIAA Aviation 2019 Forum, Seite 1-9. Dallas, Texas, USA, 2019. <https://doi.org/10.2514/6.2019-3387>.
- Linke (2016) Ökologische Analyse operationeller Lufttransportkonzepte. Dissertation, Technische Universität Hamburg, Hamburg, Deutschland, Februar 2016.
- Niklaß (2019) Ein systemanalytischer Ansatz zur Internalisierung der Klimawirkung der Luftfahrt. Dissertation, Technische Universität Hamburg (TUHH), Hamburg, Deutschland, Januar 2019.
- Pletzer & Grewe (2023) Wirkung von Emissionen in 30-38 km Höhe auf die Atmosphäre. Präsentation. In DGLR-Workshop zum Thema Missionsführung, Bahnführung und Bahnplanung für innovative Luftfahrtanwendungen (23.-24. Mai 2023, Manching, Deutschland).
- Saccone (2022) Computational evaluations of emissions indexes released by the STRATOFly air-breathing combined propulsive system. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 94(9):1499-1507. <https://doi.org/10.1108/AEAT-01-2022-0024>.
- Viola (2021) Aerodynamic Characterization of Hypersonic Transportation Systems and Its Impact on Mission Analysis. Energies, 14(12):1-28. <https://doi.org/10.3390/en14123580>.