

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. Bodmer¹ und V. Gollnick¹

¹ Institut für Lufttransportsysteme (ILT), Technische Universität Hamburg, Blohmstr. 20, 21079 Hamburg

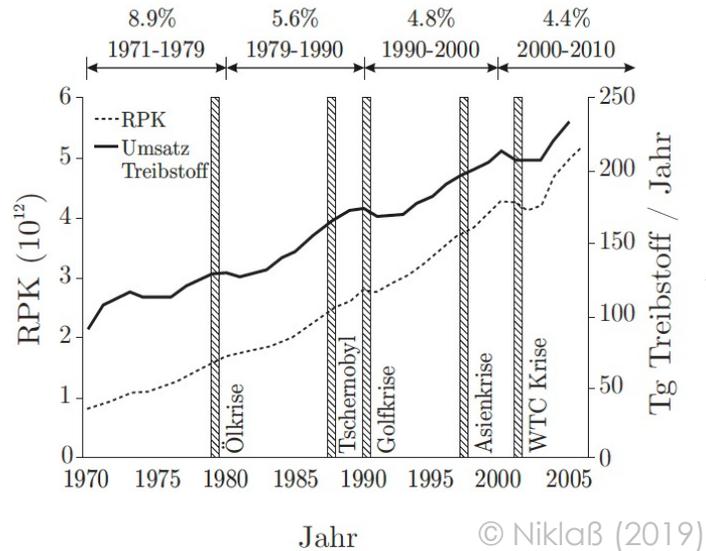
23.05-24.05.2023 - Airbus Defence and Space - 85077 Manching, Deutschland

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 Klimaaoptimale 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 Transportleistung

Steigerung der Transportfrequenz
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

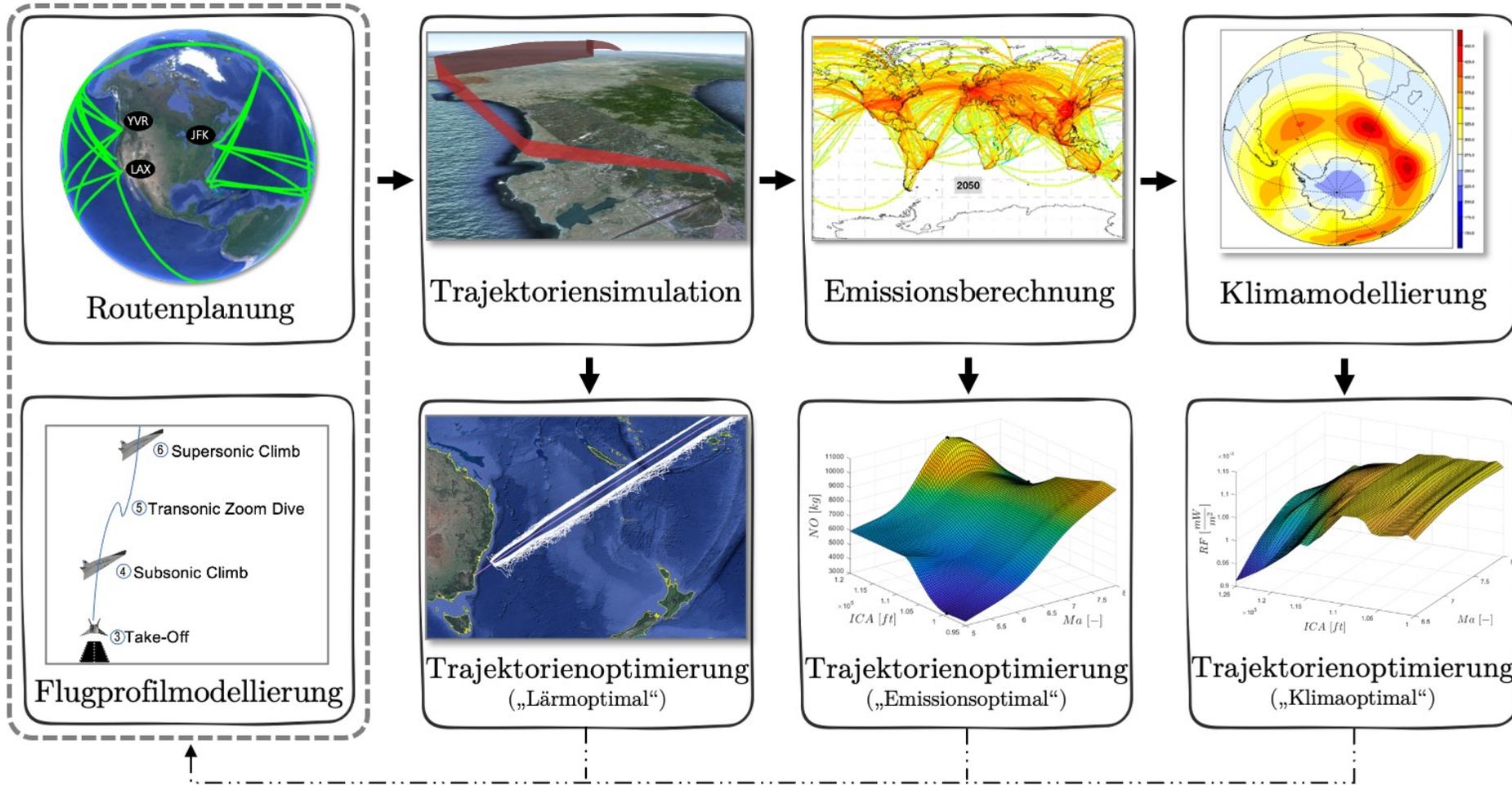
© Hirschel (1987)

Das weltweite Passagieraufkommen verdoppelt sich im Schnitt alle 15 Jahre

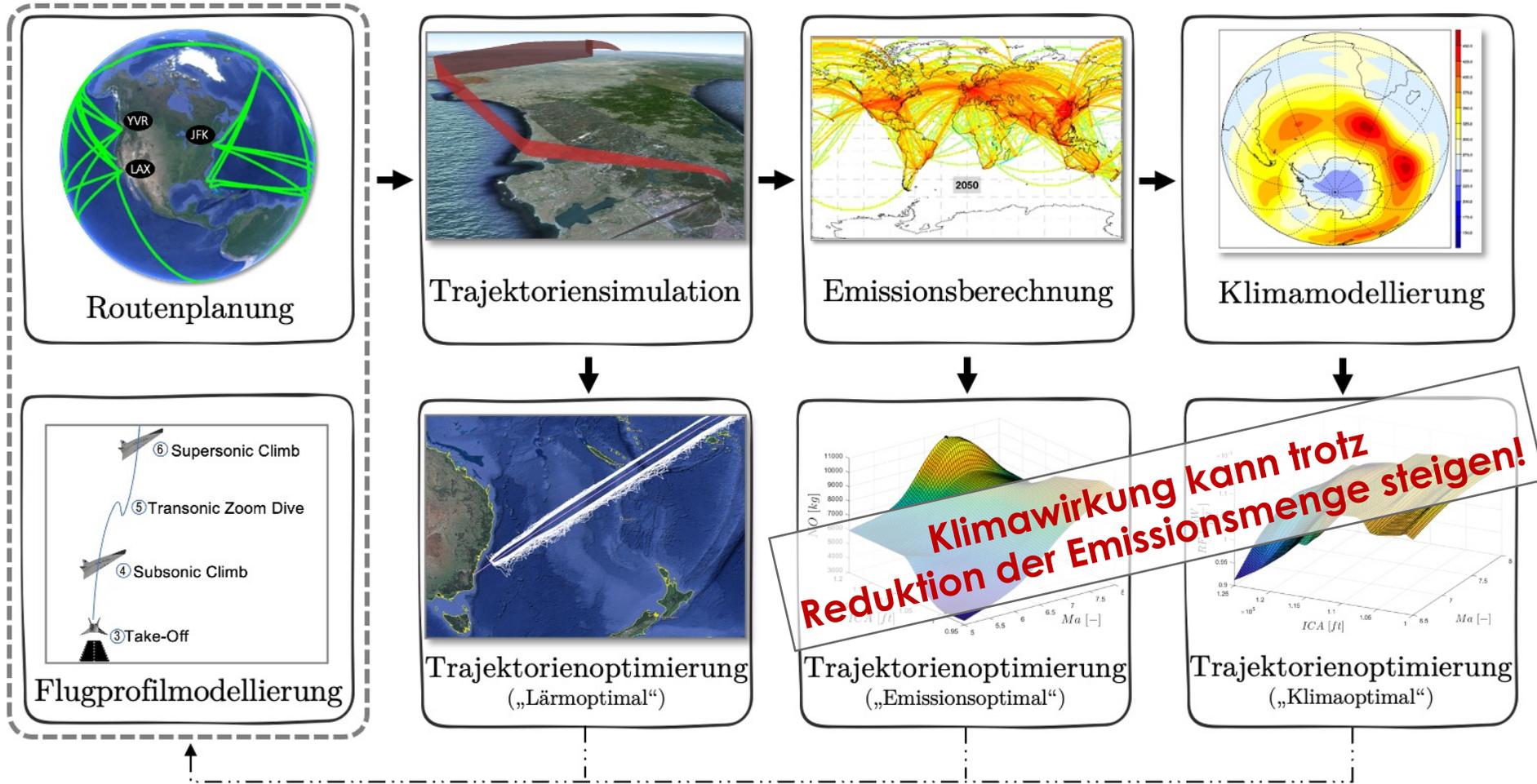


STRATOFly-MR3
2019

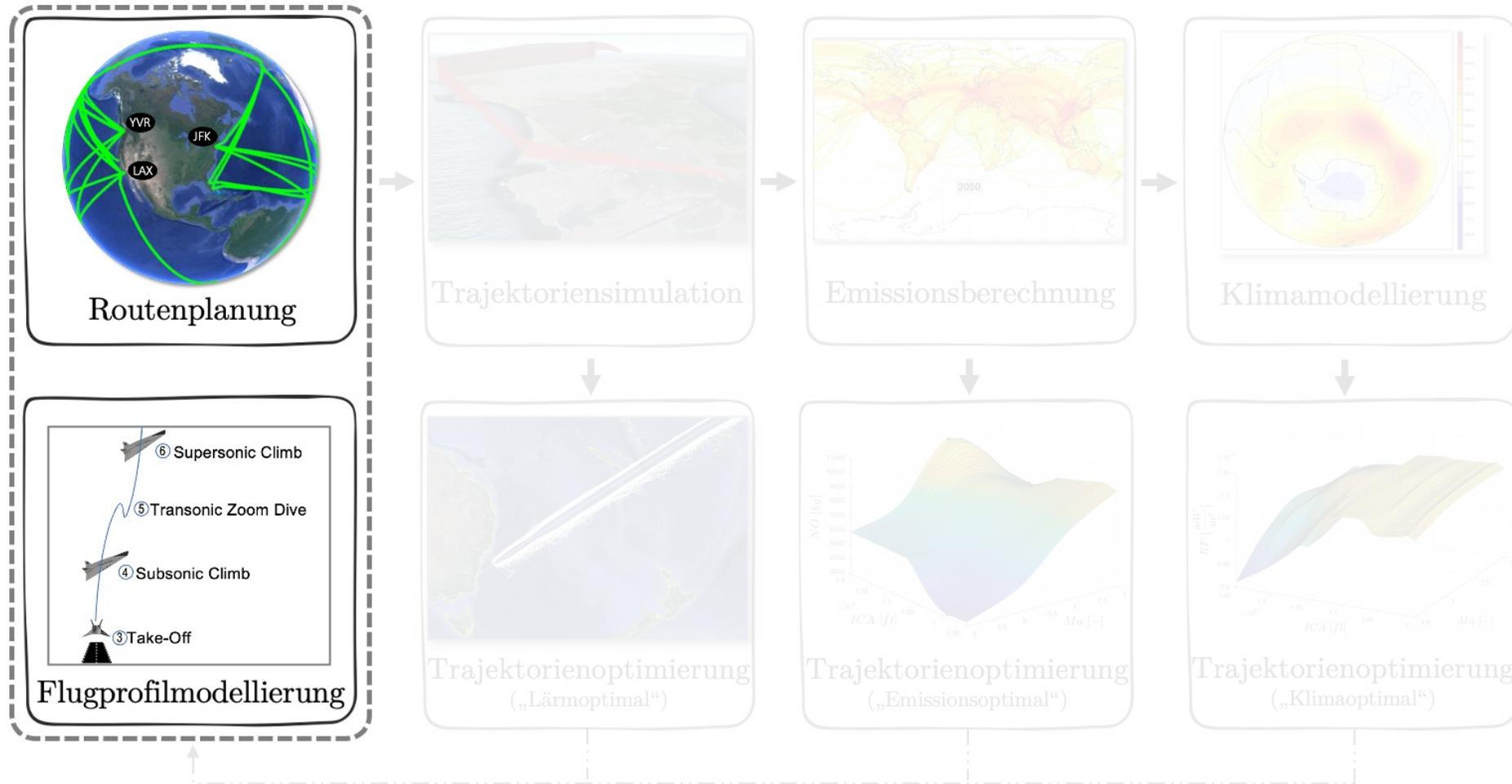
Klimaoptimierter Hyperschall-Flugbetrieb



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, ...)



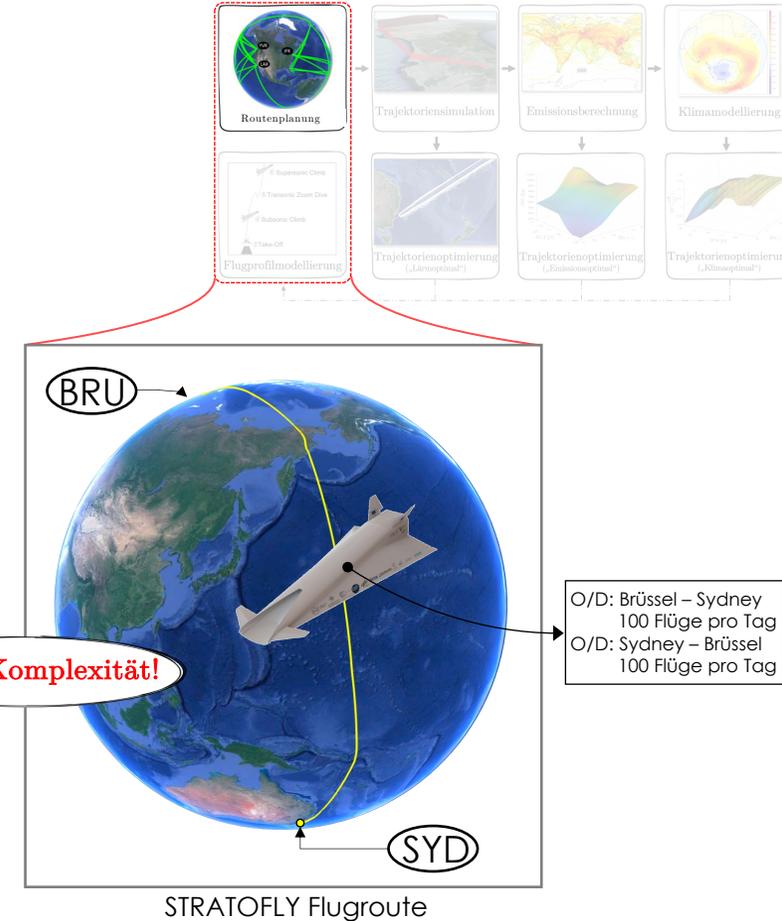
“In this context [...] a fleet of **200 hydrogen fueled hypersonic airliners** flying **once a day** for **360 days** from Brussels to Sydney [is investigated].”



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

Anwendungsfall Flottenebene

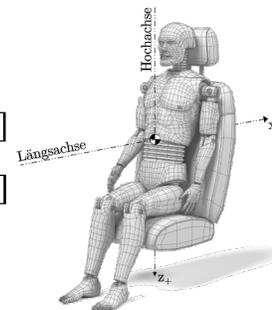
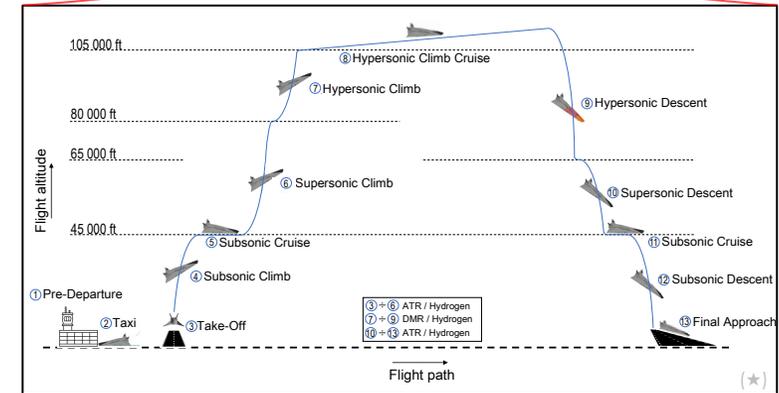
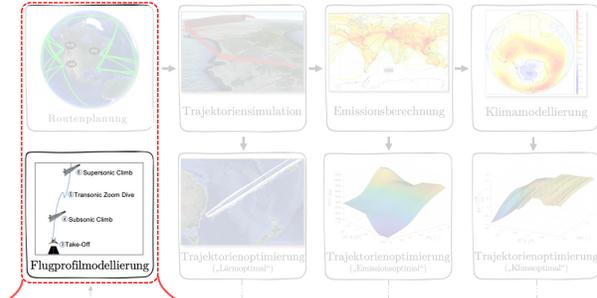
= Hohe Komplexität!



(★) geodätische Auslegungshöhe für Hyperschall-Missionsprofil

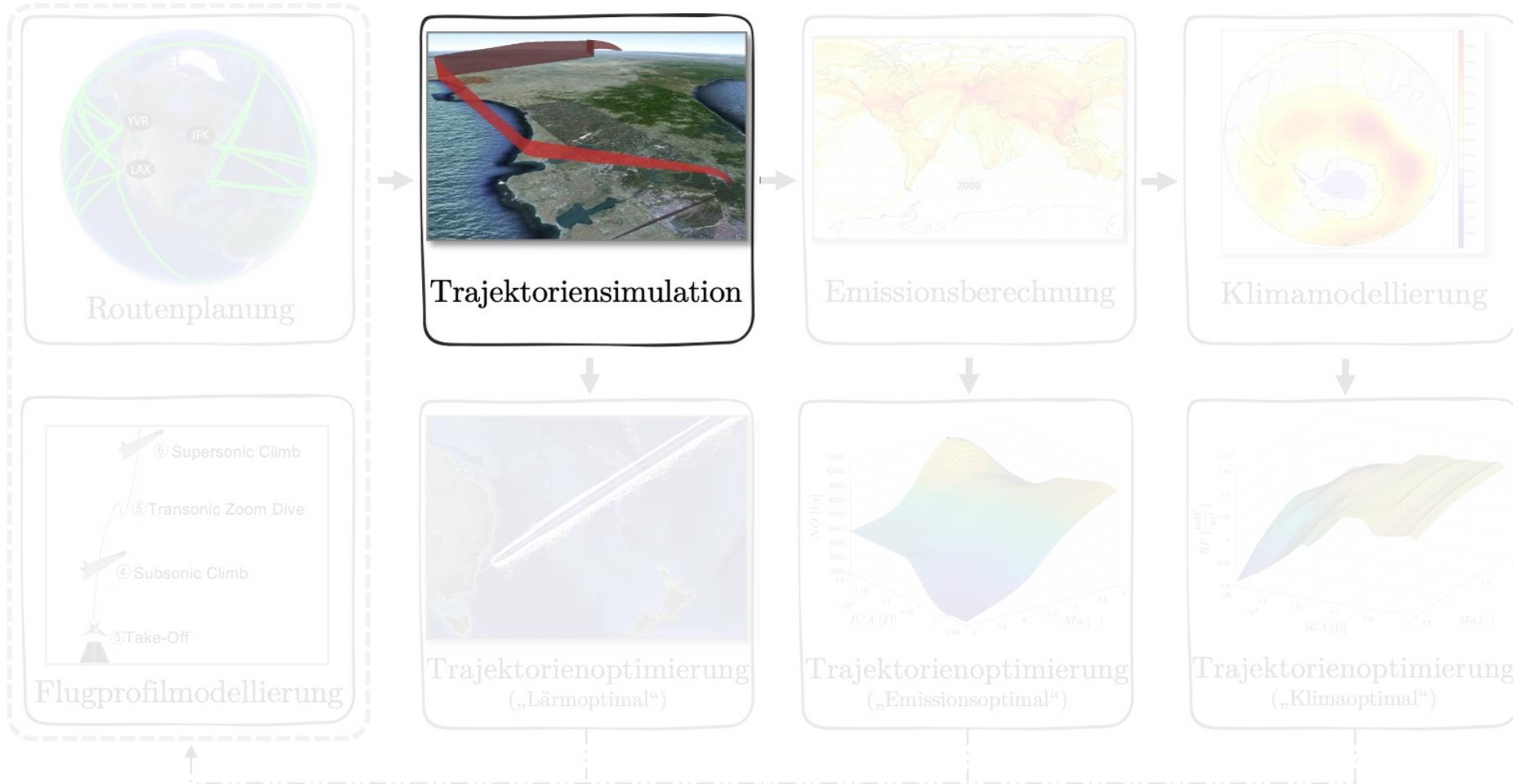
3.2 Flugprofilmodellierung

- 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): $n_x = [-0.35; +0.4]$



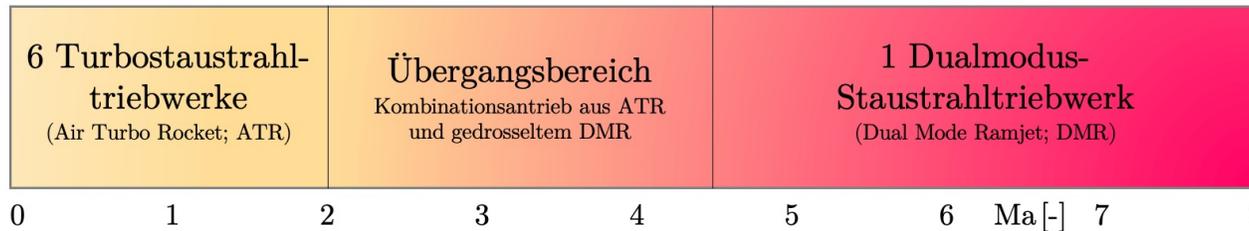
(★) Flugphasen nur symbolisch dargestellt; nicht vollständig

Klimaoptimierter Hyperschall-Flugbetrieb

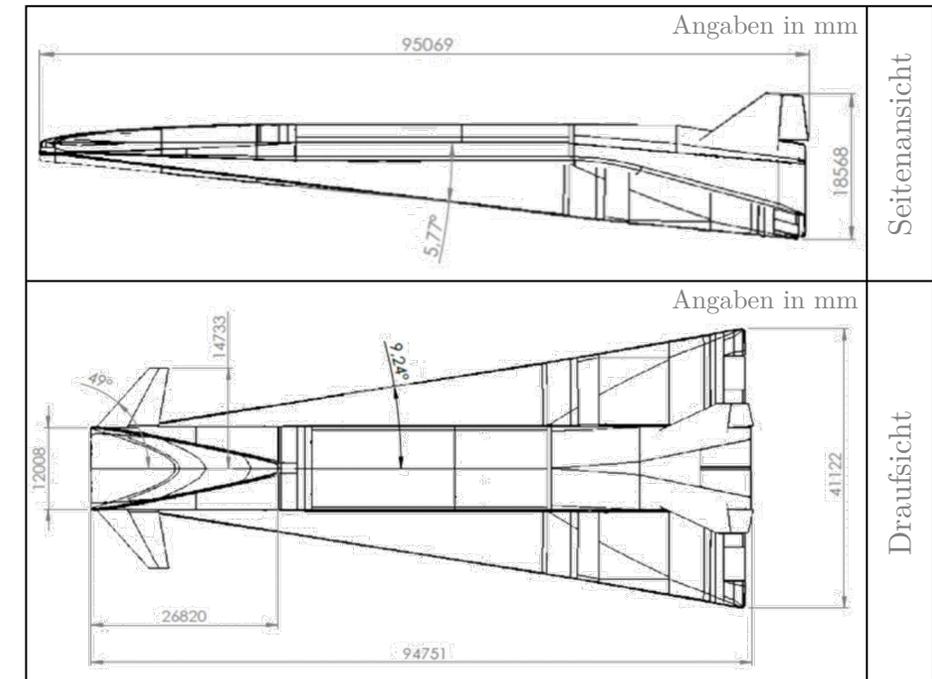
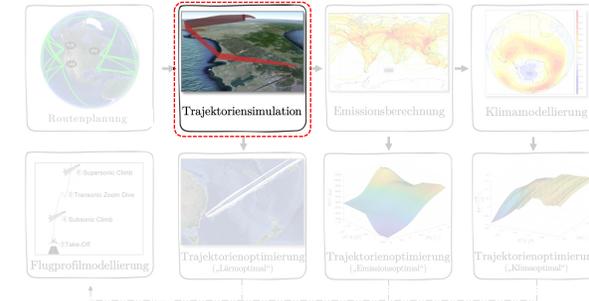
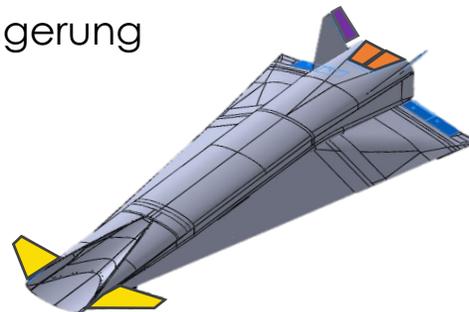


4.1 Fluggerät

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



- Flüssig-Wasserstoff (LH₂) als Flugkraftstoff
- Integration von Antriebssystem in Flugzeugzelle
→ Oberseite: Kombinationsantrieb; Unterseite: Passagierkabine (300 PAX)
- Integral-Blasentankkonzept zur kryogenen LH₂-Lagerung
- Flugsteuerung:
 - 2 Canards
 - 4 Elevons (2 auf jeder Seite)
 - 2 Rumpfkappen
 - Doppeltes Seitenleitwerk



Abmessungen des Fluggeräts *MR3*

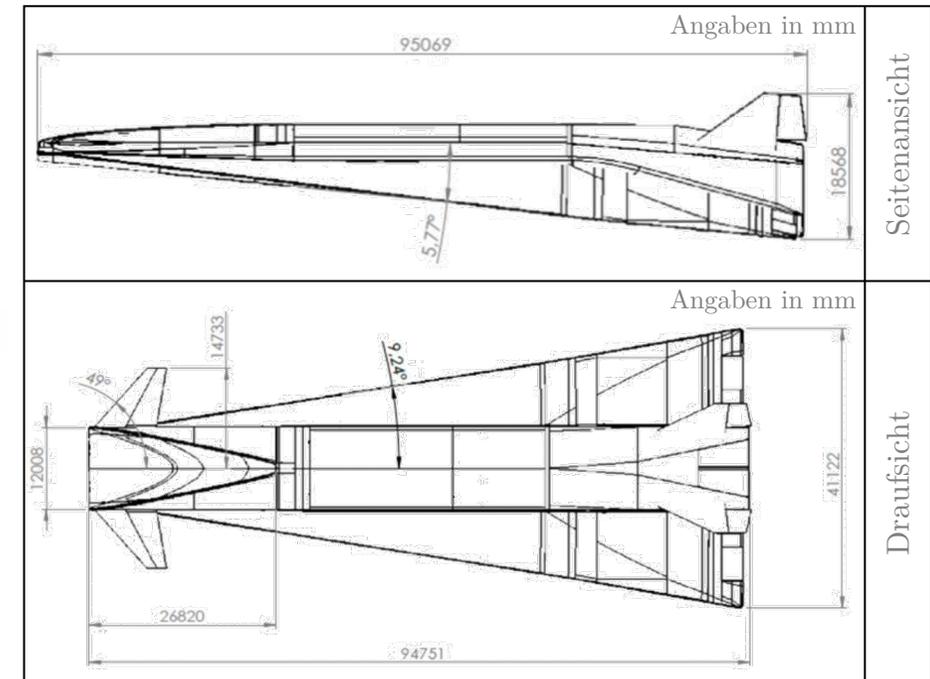
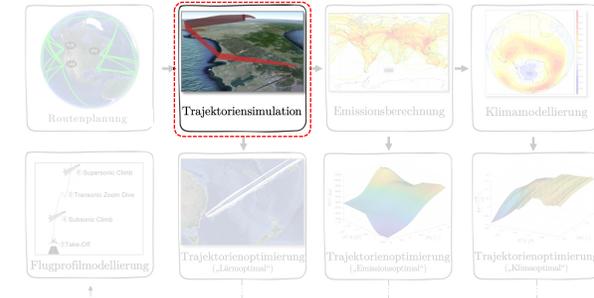
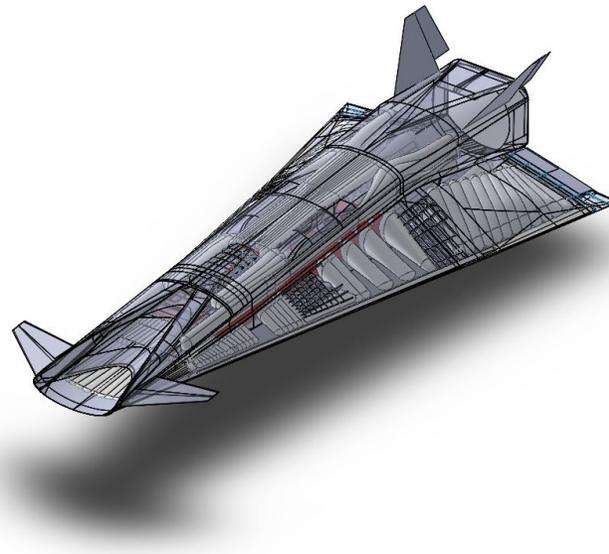
© Ferretto (2019)

4.1 Fluggerät

- Geometriedaten und Massenübersicht:

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

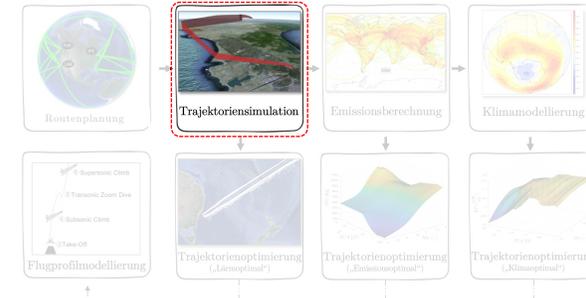
© Ferretto (2019)



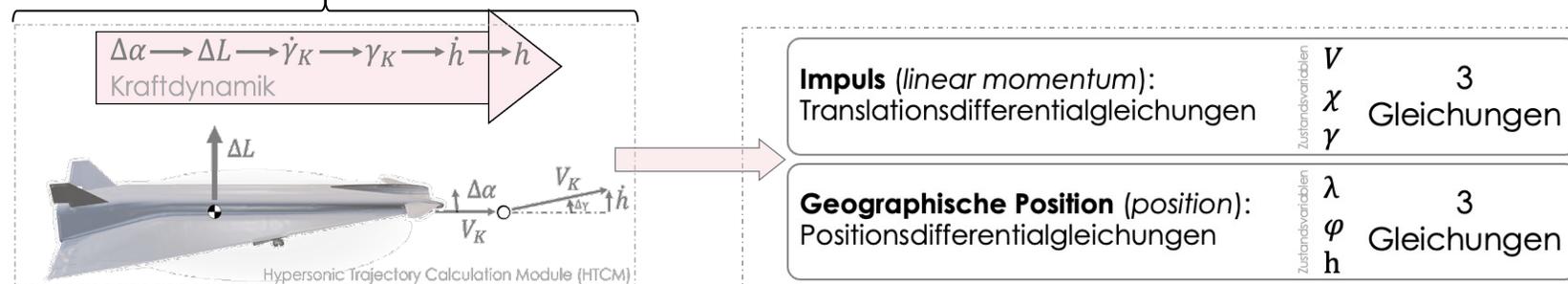
Abmessungen des Fluggeräts MR3

© Ferretto (2019)

4.2 Hypersonic Trajectory Calculation Module

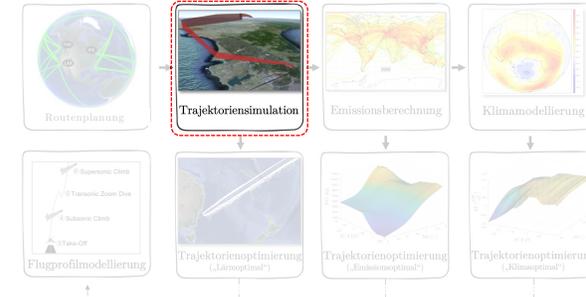


- Software-Derivate von **Trajectory Calculation Module** (TCM; DLR Hamburg) © Linke (2016)
- Erweitert/Adaptiert zur Berechnung von (realistischen) **hypersonischen 4D-Flugtrajektorien**
- Implementiert in **MATLAB**; flexible und modulare Forschungsumgebung
- Flugdynamik abgebildet als **Punktmassenmodell**



- 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

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

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

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

Positionsdifferentialgleichungen			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

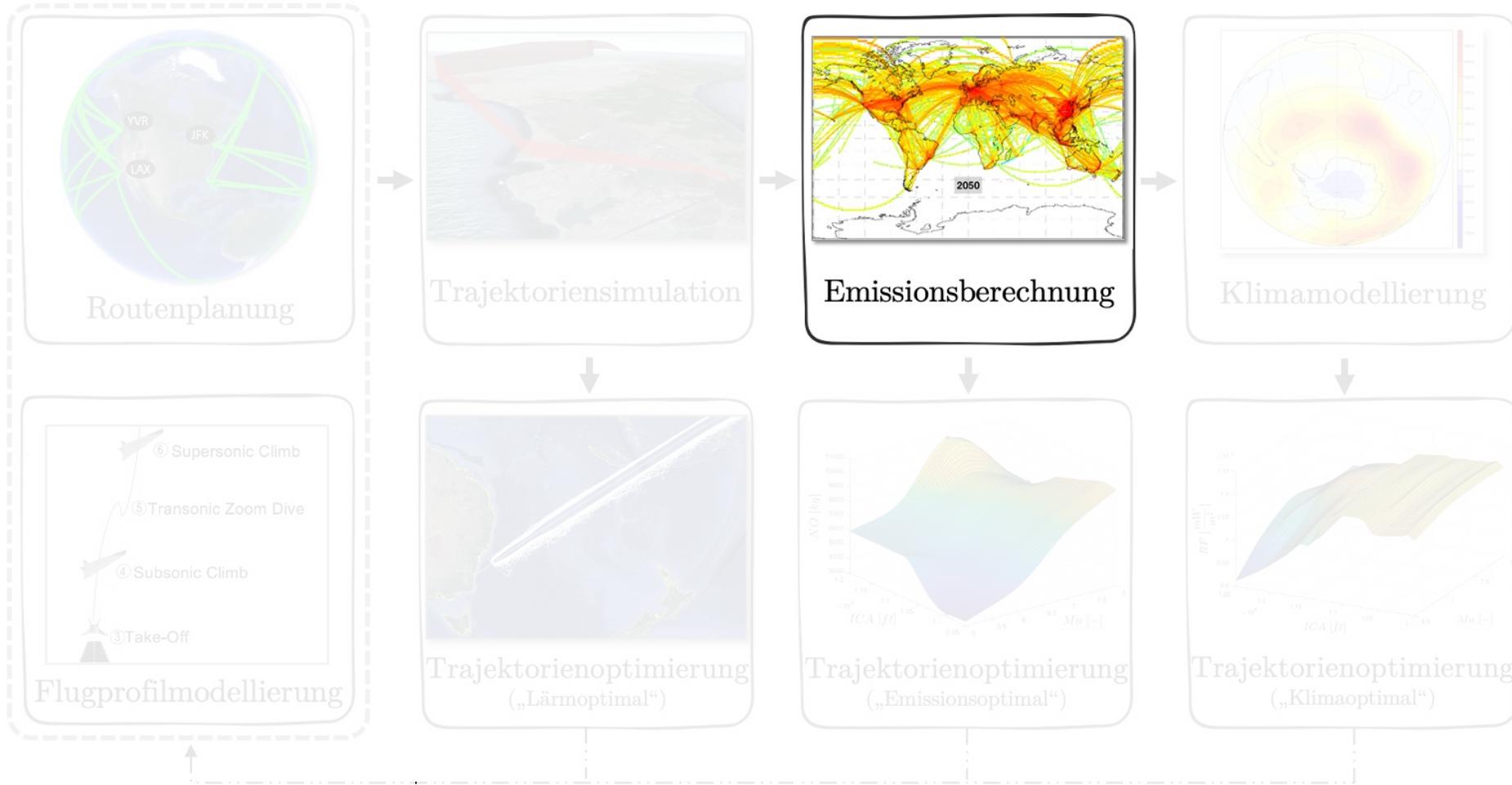
- Quasistationäre Masse zur Herleitung der BWGLs
- Runde Erde $r_E = 6356766 \text{ m}$ © ISO 2533 (1979)
- Erdrotation $\omega_E = 2\pi / (24 \text{ h})$ ist näherungsweise konstant
- Referenzpunkt (R), Schwerpunkt (G) und aerodyn. Bezugspunkt (A) sind kongruent
- Standardatmosphäre (kein Wind) © ISO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

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

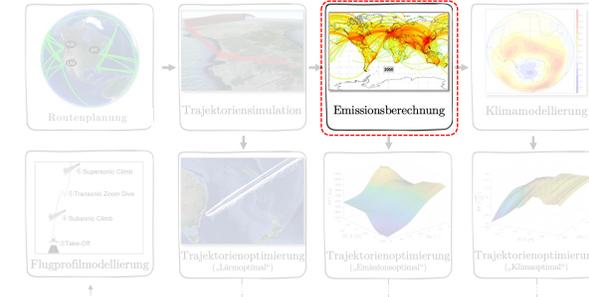
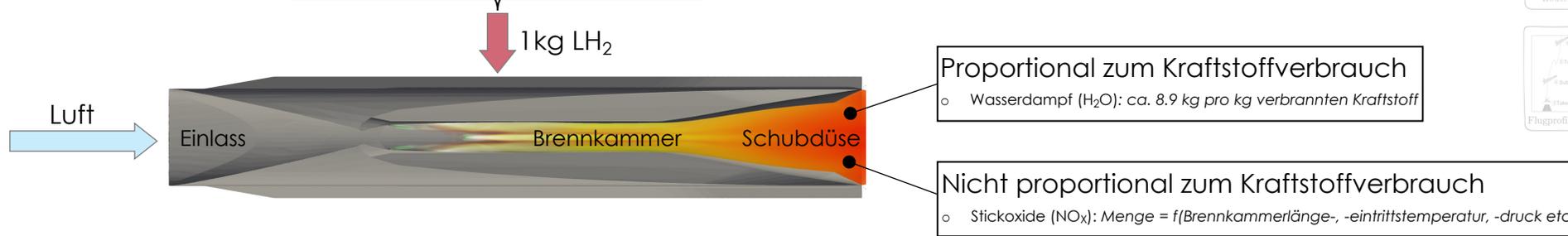
mit $g_0 = 9.80665 \frac{m}{s^2}$ (kugelförmige Erde mit homogener Massenverteilung)

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** (LH₂) zur Schubgenerierung



- Fokus auf klimawirksamsten Spurenstoffe für Optimierung → **Stickstoffmonoxid (NO)**- und **Wasserdampf (H₂O)**-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} :

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

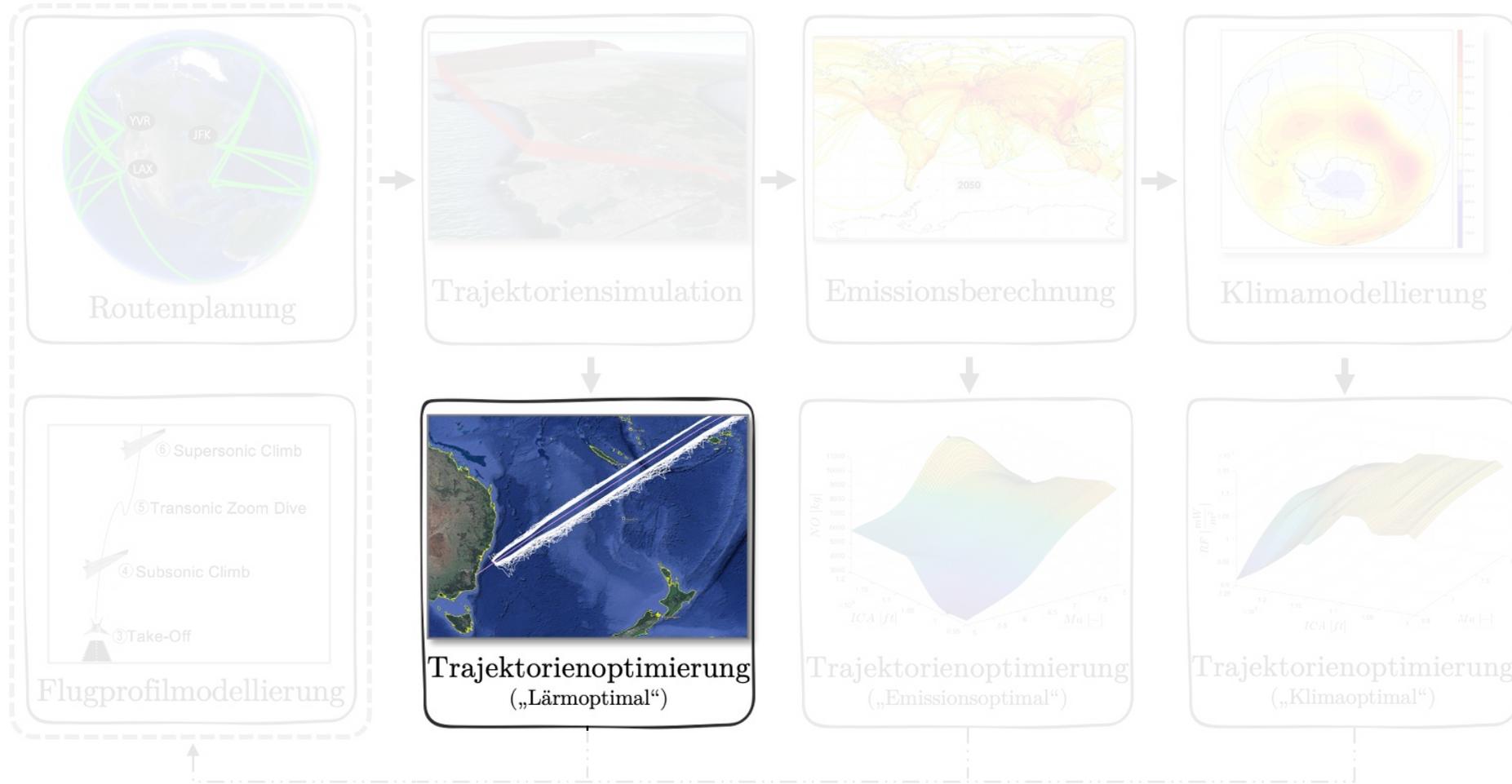
- Berechnung die entlang der Trajektorie freigesetzten **Triebwerksemissionen** m_i :

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

- 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

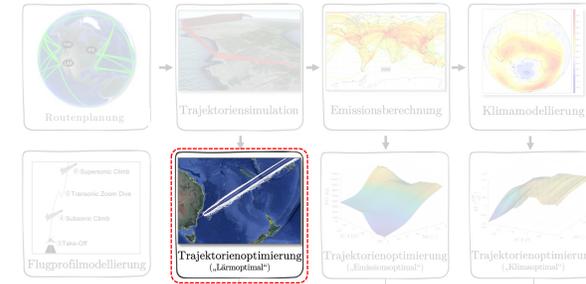
Eingabedaten: $\underbrace{\lambda, \varphi, h^{(\star)}}_{\text{Position}} \quad \underbrace{Ma}_{\text{Geschwindigkeit}} \quad \underbrace{\chi, \gamma, \mu}_{\text{Lage}}$

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

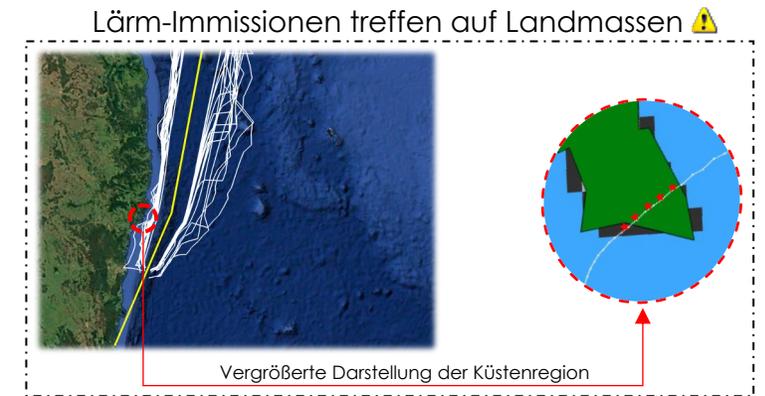
Steuergröße für Optimierungsalgorithmus: **Laterale Wegpunktkoordinaten** λ, φ

- 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)



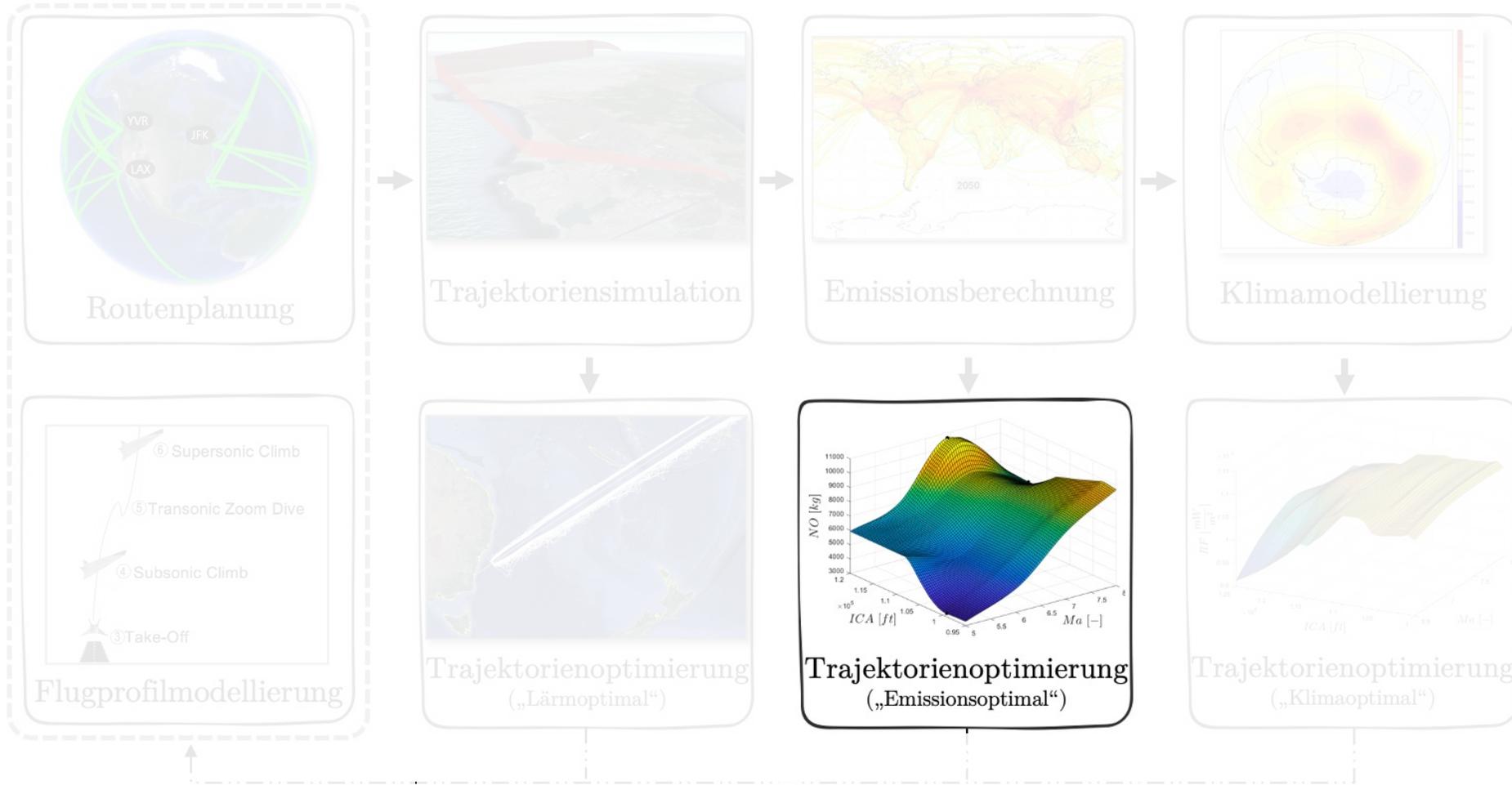
Technische Details

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

= **Lärmoptimal**

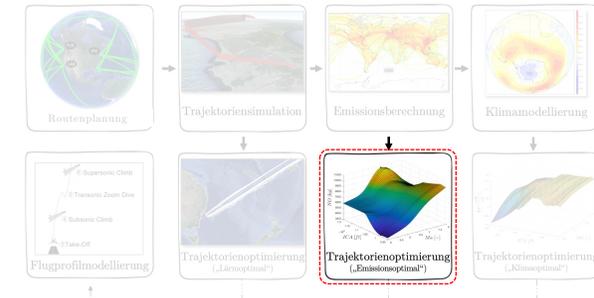
$h^{(\star)} = 95\,000\text{ ft}$ (konservative Betrachtung)

Klimaoptimierter Hyperschall-Flugbetrieb



6.2 Emissionsoptimale Flugtrajektorien (1D-Vertikal)

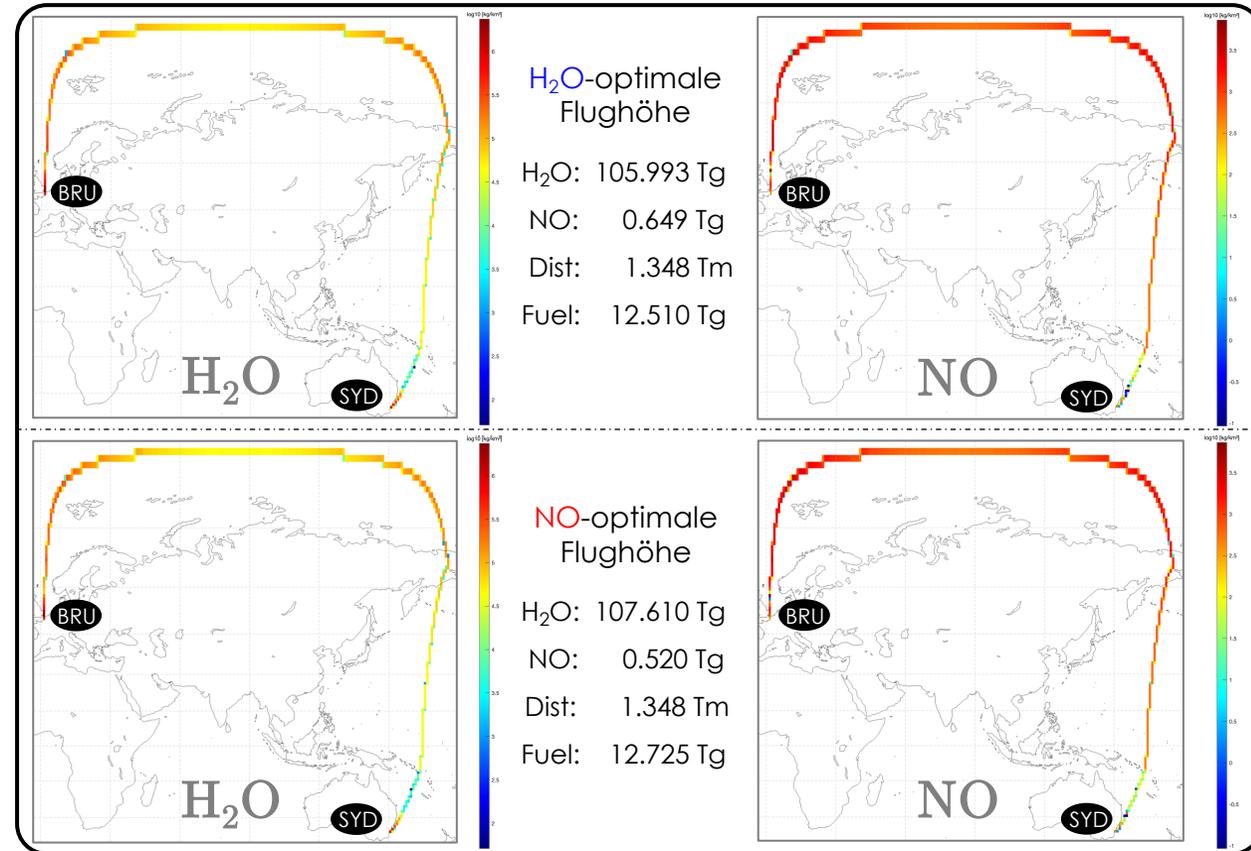
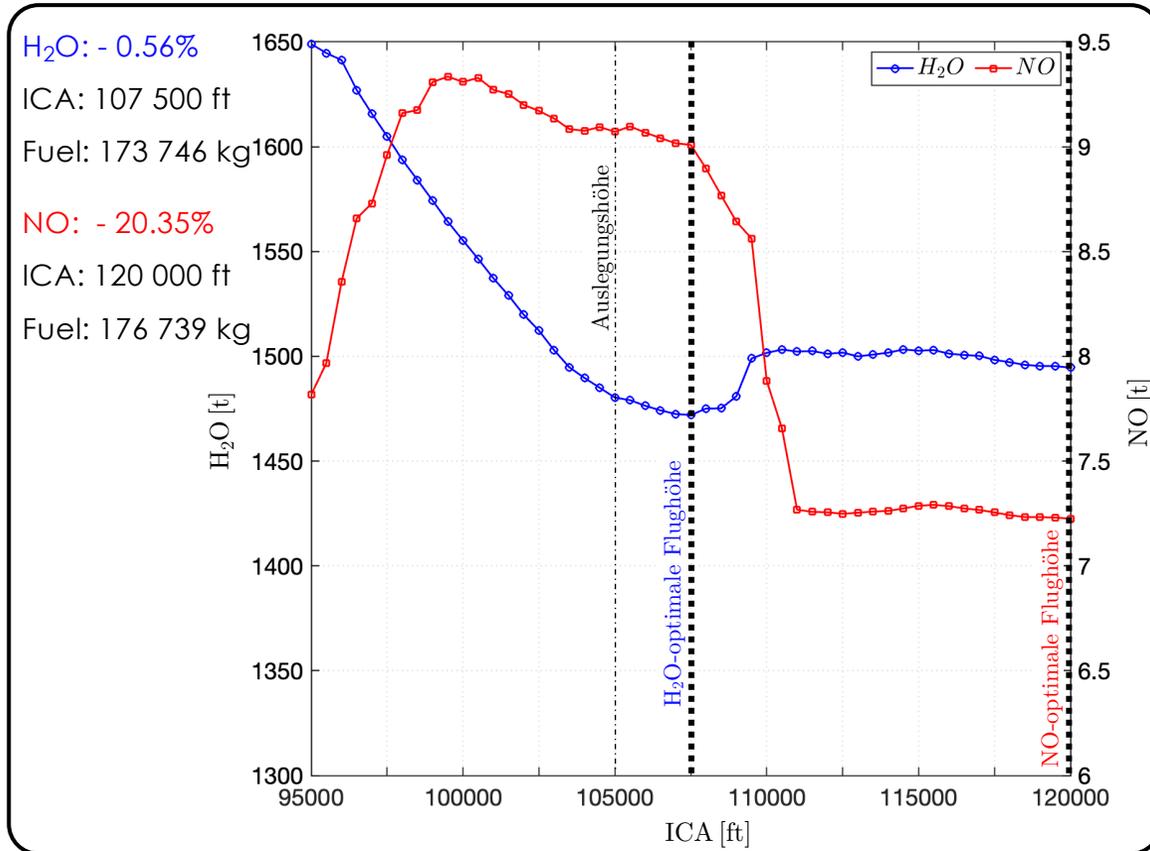
- Ziel: Identifikation von **H₂O-/NO-optimalen** Trajektorien
→ Trajektorien weisen hinsichtlich des Optimierungskriteriums die **kleinste H₂O-/NO-Emissionsmenge** auf
- Ansatz: “**Brute-Force**“-Suche
→ Betrachtetes Höhenintervall: $h \in [95\,000\text{ ft}; 120\,000\text{ ft}]$
→ Inkrementelle Suchschrittweite: 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)

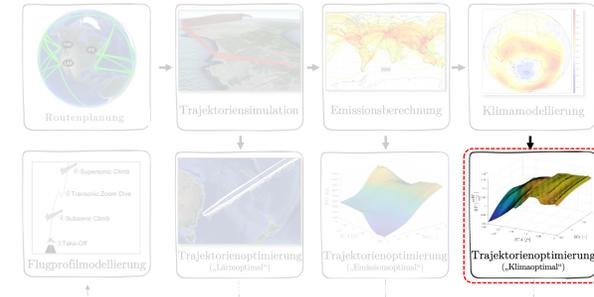
H₂O/NO-optimale Trajektorien: **Missionsebene**

H₂O/NO-optimale Trajektorien: **Flottenebene**



6.3 Klimaaoptimale Flugtrajektorien

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



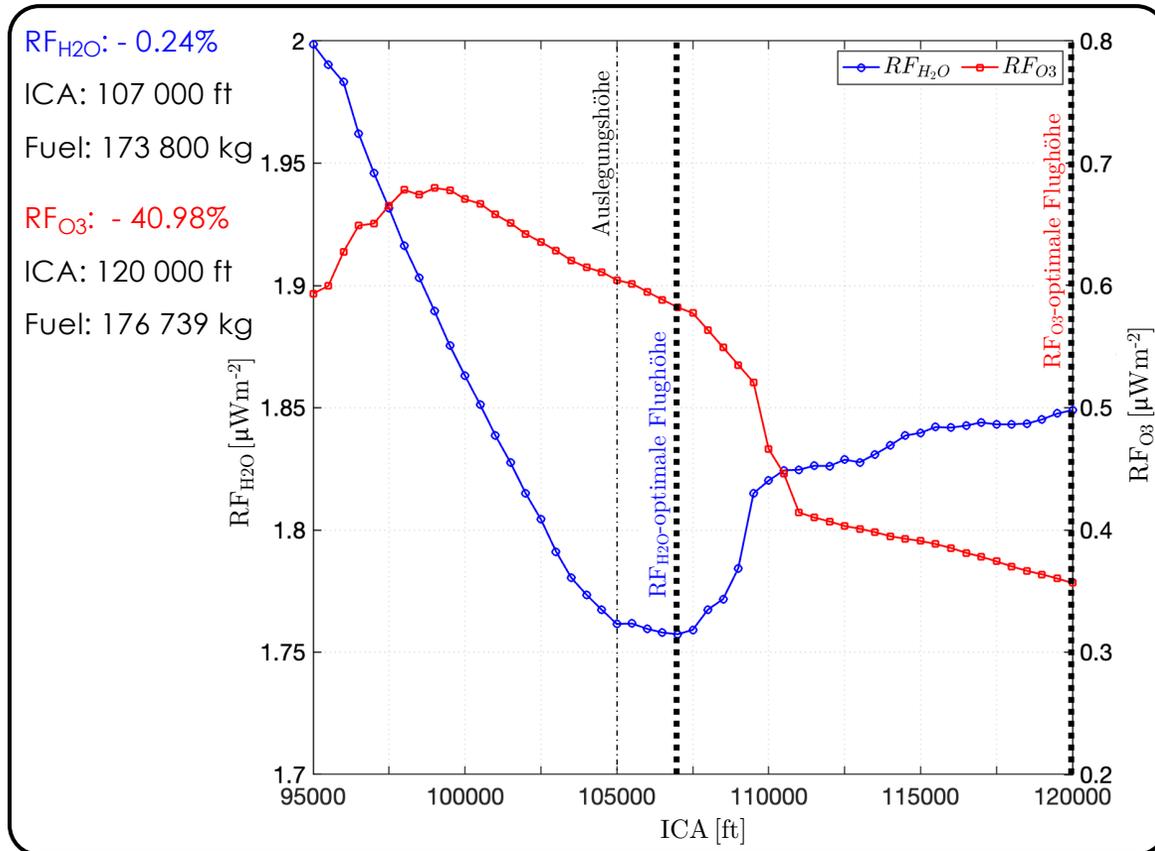
- Bewertungsmetrik: **Strahlungsantrieb** (engl. Radiative Forcing; RF)
 - Wasserdampfemissionen (**H₂O**): Direkte Änderung der Strahlungsbilanz
 - Stickoxidemissionen (**NO_x**): Indirekte Änderung der Strahlungsbilanz über **Ozon (O₃)** und Methan (CH₄; statistisch nicht signifikant)
- Interpretation: Positiver RF → „wärmender“ Effekt; negativer RF → „kühlender“ Effekt
- Software: Entwickelt von **Johannes Pletzer** (Institut für Physik der Atmosphäre, DLR Oberpfaffenhofen) © Pletzer & Grewe (2023)
- Eingabedaten:

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

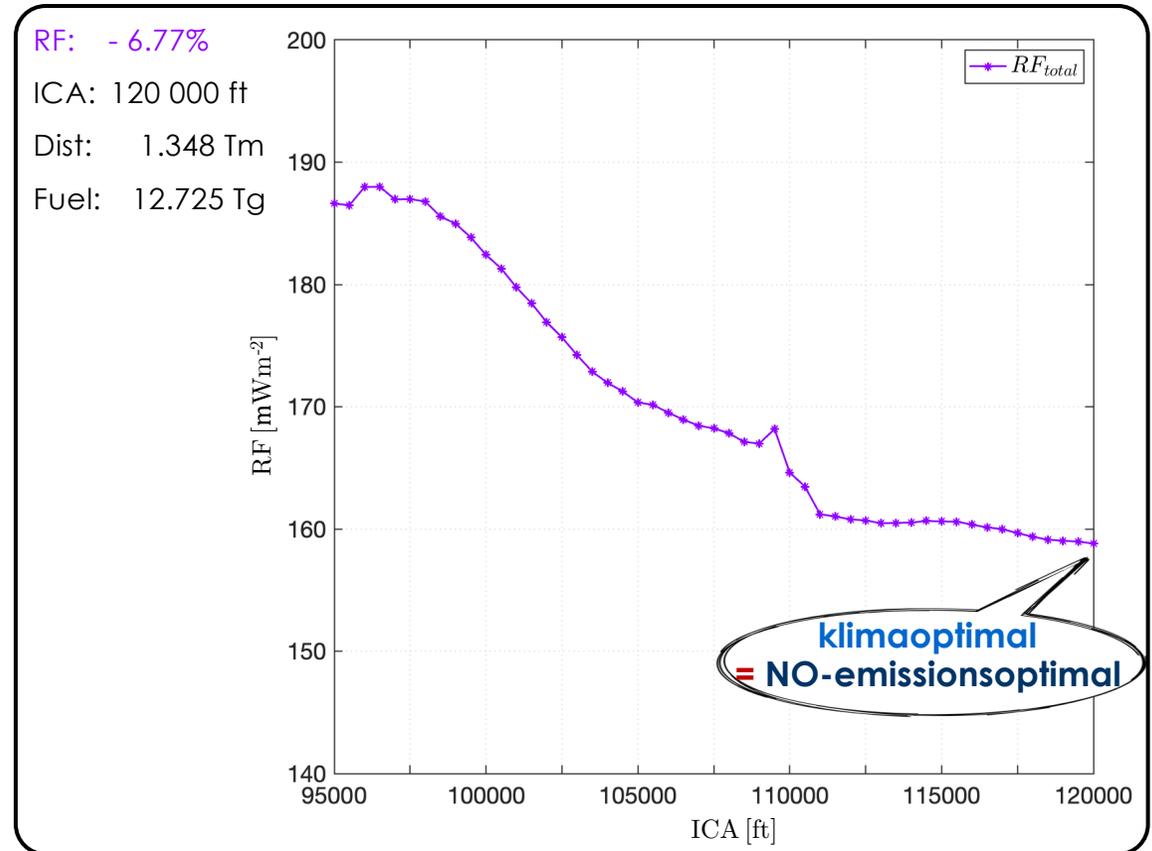
$RF_{\text{H}_2\text{O}}, RF_{\text{O}_3}, RF_{\text{total}}$
⏟
Klimametrik
- Ansatz: “**Brute-Force**“-Suche
 - Betrachtetes Höhenintervall: $h \in [95\,000\text{ ft}; 120\,000\text{ ft}]$
 - Inkrementelle Suchschrittweite: 500 ft
- Steuergröße für Optimierungsalgorithmus ist **anfängliche Reiseflughöhe**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

6.3 Klimaoptimale Flugtrajektorien (1D-Vertikal)

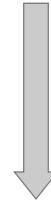
RF_{H2O}-/RF_{O3}-optimale Trajektorien: Missionsebene



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>.