

UNTERSUCHUNG EINER ENERGIEEFFIZIENTEN KLIMATISIERUNG EINES EVTOLS DURCH EIN ZONALES RAUMKABINENMODELL UND EINEN KABINENDEMONSTRATOR

Ch. Matheis, V. Norrefeldt,

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Fraunhoferstr. 10, 83626 Valley, Deutschland

Zusammenfassung

EVTOL werden als Fortbewegungsmittel im urbanen Raum immer mehr Teil der Realität. Um deren Reichweite und den Komfort in der Kabine effizient zu kombinieren, wird in diesem Vorhaben an einer energieeffizienten Klimatisierung geforscht. Mittels eines zonalen Simulationsmodells werden verschiedene Belüftungskonzepte getestet und auf den thermischen Komfort und die Energieeffizienz bewertet. Des Weiteren wird unter Berücksichtigung der Simulationsergebnisse ein Kabinendemonstrator angefertigt, der für weitere messtechnische Untersuchungen verwendet wird.

1. EINLEITUNG

In einer von der NASA beauftragten Analyse geben [Prince und Helton, 2020] die Akzeptanz der Kabine als eine von insgesamt 24 identifizierten Herausforderungen für die Urban Air Mobility und eVTOL Fluggeräten (electrical Vertical Takeoff and Landing) an. In der Vergangenheit wurden grundsätzliche Design-Optionen betrachtet, wie z.B. ob die Fluggeräte eher als Drohne oder als Senkrechtstarter mit Drehflügeln ausgeführt werden sollen [Krenzler et al., 2019]. Weitere akute Herausforderungen sind die Einbindung der Fluggeräte in den Luftraum, Bodenprozeduren, Zertifizierungsansätze [Prince und Helton, 2020]. In Bezug auf die Akzeptanz der eVTOL Fluggeräte stellen [Babetto et al., 2023] die Sicherheit und die Akustik als maßgeblich für die erfolgreiche Verbreitung dar. Die Optimierung des thermischen Raumklimas von eVTOLs wurde bisher nicht in wissenschaftlicher Tiefe betrachtet, weshalb dies zum Ziel des KlimaUAM Vorhabens erklärt wurde. Das Potential einer Optimierung wird in [Lahlou et al., 2020] verdeutlicht. Darin ist die durchschnittliche Energie in batteriebetriebenen Fahrzeugen, welche für die Klimatisierung aufgewendet werden muss, mit 20% angegeben. Dieser Anteil kann allerdings bei ungünstigen Wetterlagen auf bis zu 60% ansteigen.

Mit vier bis sechs Passagieren gliedern sich die eVTOLs zwischen elektrisch betriebenen Automobilen und Flugzeugen ein, wobei sie in der Zertifizierung eindeutig als Fluggerät einzuordnen sind. Bei der Bewertung des thermischen Raumklimas eines eVTOLs können auf Erfahrungen aus dem Fahrzeug-, Flugzeug- und Gebäudebereich zurückgegriffen werden. Im Gebäudesektor wird die DIN EN ISO 7730 Norm für eine thermische Bewertung des Raumklimas herangezogen. Hier wird eine Schichtung von unter 4 K zwischen Fuß- und Kopfhöhe gefordert. Die typischen Klimaparameter für Flugzeuge sind durch die ASHRAE 161 Norm weitgehend festgelegt. So wird ein Zuluftvolumenstrom von umgerechnet 9,4 l/s je Passagier gefordert, welcher durch eine Mischung aus mindestens 3,5 l/s Frischluft und Umluft sichergestellt werden kann. Die Lufttemperatur in der Kabine soll zwischen 18,3 und maximal 26,7 °C liegen. Erfahrungsgemäß ist bei Passagiermaschinen diese Luftmenge ausreichend, um die inneren Lasten durch Passagiere und Systeme (z.B. In-Flight Entertainment),

solare Gewinne und Wärmeleitungsgewinne / -verluste auszugleichen. Übertragen auf ein Flugtaxi mit z.B. vier Passagieren, wäre entsprechend eines Passagiermaschinenentwurfs ein Zuluftvolumenstrom von 0,0376 m³/s notwendig. Diese Luftmenge ist deutlich geringer als typische Fahrzeugklimatisierungen fördern. [Jahn 2021] vermisst einen BMW 6 GT und stellt je nach Betriebspunkt und Fahrgeschwindigkeit Gesamtluftvolumenströme von 0,05 bis 0,34 m³/s fest. [Zhou et al., 2019] führen Probandenversuche und Messungen an einem Versuchs-PKW mit klassischer Klimaanlage in sommerlichen Bedingungen durch. Dabei stellen sie mit der mittleren Gebläsestufe einen Luftvolumenstrom von ca. 0,12 m³/s ein. In ihrer Untersuchung stellen sie fest, dass die Zulufttemperatur eines Außen in der Sonne (34,3 °C, 518 W/m²) geparkten Fahrzeugs innerhalb von 15 min von anfänglich 51,7 °C auf 13,5 °C sank.

Aus Erfahrungen mit Klimatisierungskonzepten in kleineren Fluggeräten wie einem Business Jet zeigt sich, dass ebenfalls die Möglichkeit besteht, zwischen einer bodennahen und einer deckennahen Lufteinbringung umzustellen. Hierdurch können sowohl Quell- wie Mischlüftungskonzepte in der Kabine realisiert werden [Norrefeldt et al., 2015].

2. METHODE

Im KlimaUAM Vorhaben wird simulationsbasiert die Kabinenbelüftung untersucht. Hierzu wird ein zonales Modell der Passagierkabine erstellt und verschiedene Lüftungsformen werden bei unterschiedlichen externen Randbedingungen miteinander verglichen. Das Zonale Modell basiert auf dem in Modelica implementierten Velocity Propagation Zonal Model (VEPZO), das am Fraunhofer IBP entwickelt wurde [Norrefeldt et al. 2012]. Hierbei wird der Innenraum entlang der kartesischen Richtungen in kubische Volumina unterteilt, die über Strömungspfade miteinander in Luftaustausch stehen. In dem Volumenmodell sind dabei Eigenschaften der Luft als skalare Größen in der Zone hinterlegt. Im Strömungsmodell wird hingegen die Strömungsgeschwindigkeit zwischen zwei benachbarten Zonen anhand der Druckdifferenz berechnet. Umschließungsflächen werden über ihre thermische Masse und den Wärmeleitungswiderstand modelliert. Ein eigens erstelltes Preprocessing-Tool erlaubt die automatische Modellgenerierung auf Basis der

Geometrie der Umschließungsflächen [Pathak et al., 2014]. Durch die zonale Modellierung können Simulationen im Vergleich zu CFD-Rechnungen mit geringerem Aufwand durchgeführt werden. Gleichzeitig werden der Einfluss der Lage und Intensität von Wärmequellen, Lüftungsöffnungen etc. erfasst.

2.1. Modellaufbau

Ausgehend von einer generischen Geometrie einer eVTOL Passagierkabine (BILD 1) wird zunächst ein zonales Modell erstellt. Die Kabine ist 3,46 m lang, 2,01 m breit und 1,50 m hoch und ist in 140 Zonen unterteilt. Dabei entstehen die Zonengrößen in TAB 1.

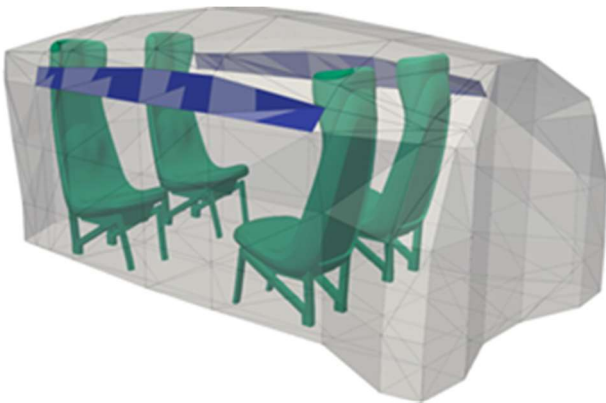


BILD 1. Zonales Modell der generischen Kabinengeometrie

TAB 1. Zoneneinteilung der Passagierkabine

Richtung	Gesamtmaß in m	Zonengrößen in m
X	2,01	0,420 – 0,400 – 0,370 – 0,400 – 0,420
Y	3,46	0,300 – 0,500 – 0,700 – 0,500 – 0,700 – 0,250 – 0,510
Z	1,50	0,250 – 0,375 – 0,375 – 0,500

Es werden vier Passagiere in Form eines thermophysiologicalen Menschenmodells in das Raumströmungsmodell integriert. Dieses berücksichtigt den Wärmeaustausch zwischen Passagier und Umgebung in folgenden Aspekten:

- Wärmeübertragung zwischen Körperkern und Haut
- Wärmeleitung durch die Kleidung
- Konvektion zwischen Kleidung und Luft
- Wärmestrahlung zwischen Kleidung und Umschließungsflächen
- Wärmeübertragung der Kontaktfläche (Sitz)

Es können das Gewicht der Person, der Bekleidungs-dämmwert, die Aktivität, sowie die Kontaktfläche zum Sitz eingestellt werden. Daraus lässt sich eine Schwitzrate bei erhöhten und eine Zitterrate bei niedrigen Umgebungstemperaturen berechnen. Idealerweise befindet sich der Mensch im thermischen Gleichgewicht, sodass weder Zittern noch Schwitzen eintritt.

Im Modell wird ebenfalls der Wärmeeintrag durch die Fensterflächen in Form von langwelliger Wärmestrahlung berücksichtigt. Für die Erwärmung der Fensterscheiben im Innenraum wird mit einem g-Wert der Fenster von 0,3 gerechnet. Die Umschließungsflächen wurden mit einem Wärmewiderstand von $1,7 \text{ m}^2\text{K/W}$ angenommen, was im Winterfall zu einer Innenoberflächentemperatur von über 19°C führt.

2.2. Randbedingungen

Als Randbedingungen wurde jeweils ein Sommerfall mit 40°C Außentemperatur und ein Winterfall mit -20°C simuliert. Um den Extremfall darzustellen, werden keine Solarstrahlung im Winter und 900 W/m^2 Solarstrahlung im Sommer angenommen. Ein weiterer, dazwischen liegender Fall wird mit 0°C ohne Solarstrahlung betrachtet.

2.3. Varianten Belüftungskonzept

2.3.1. Konzept 1 – Quelllüftung

Die Zuluftöffnungen befinden sich seitlich unten neben den Passagieren. Die Luft wird mit einem niedrigen Impuls in die Kabine eingeblasen (rote Zonen in BILD 2), erwärmt sich und wird dann von vier Abluftöffnungen (blau) an der Decke seitlich abgelassen. Die geringen Luftgeschwindigkeiten sind optimal für kleine Räume, um Zugluft zu vermeiden. Jedoch ist hier von Nachteil, dass sich durch das Aufsteigen der erwärmten Luft ein vertikaler Temperaturgradient einstellt. Verstärkt durch eine geringe Raumhöhe kann dies zu thermischer Unbehaglichkeit führen.

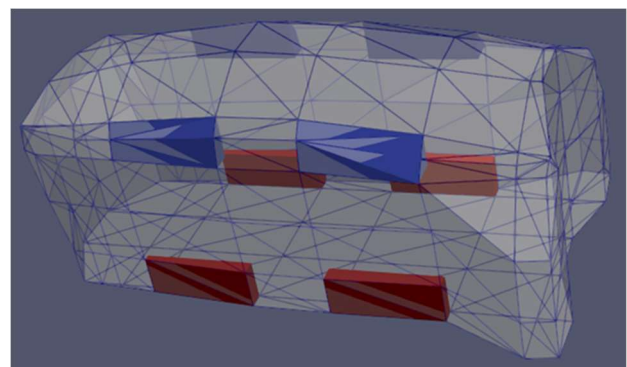


BILD 2. Konzept 1 mittels Quelllüftung (Zuluftöffnungen in rot und Abluftöffnungen in blau)

2.3.2. Konzept 2 – Turbulente Mischlüftung

Hier wird versucht, eine gute Durchmischung der Luft zu erreichen. Die Zuluftöffnung befindet sich an der vorderen Wand am Boden (rote Zone in BILD 3) und an der gegenüberliegenden Seite wird die Abluft wieder

abgesaugt (blau). Die Nachteile der Mischlüftung sind höhere sich einstellende Strömungsgeschwindigkeiten, die zu Zugluftempfinden führen können. Durch die höhere Durchmischung können allerdings Temperaturgradienten reduziert werden.

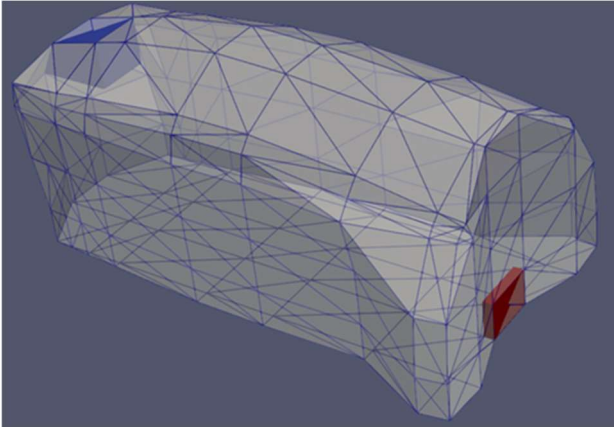


BILD 3. Konzept 2 mittels turbulenter Mischlüftung (Zuluftöffnungen in rot und Abluftöffnungen in blau)

2.3.3. Konzept 3 – Niedrigimpulslüftung über Decken-Seiteneinlässe

Das Potential einer turbulenzarmen Verdrängungslüftung wird durch vier Zuluftöffnungen (rote Zonen in BILD 4) umgesetzt, welche sich an der Decke über den Passagieren befinden. Die Luft wird mit einem geringen Impuls nach unten geblasen und in Bodennähe abgeführt (blau), was zu einer Verdrängung der Raumluft führt.

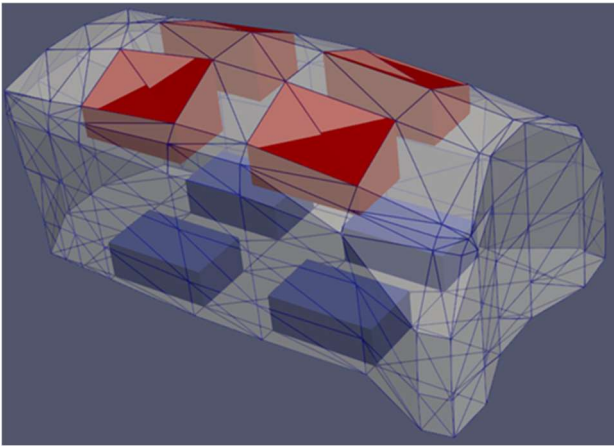


BILD 4. Konzept 3 mittels Niedrigimpulslüftung (Zuluftöffnungen in rot und Abluftöffnungen in blau)

2.3.4. Konzept 4 – Niedrigimpulslüftung über Decken-Zentraleinlass

Konzept 4 stellt eine Abwandlung der Niedrigimpulslüftung dar, indem die Luft zwischen den Passagieren von der Decke zugeführt wird (rote Zonen in BILD 5). Die Luft wird an beiden Enden des Flugtaxi am Boden abgeführt (blau).

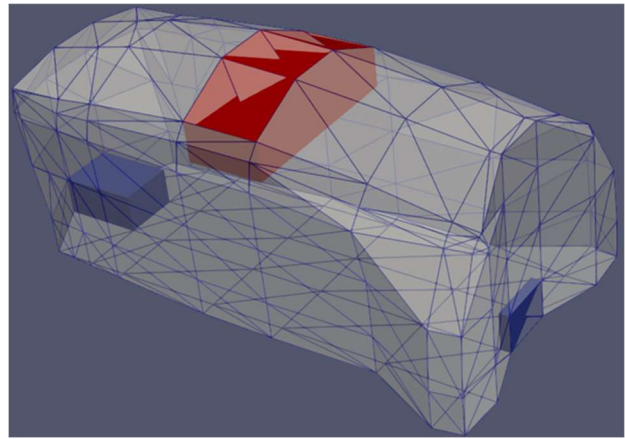


BILD 5. Konzept 4 mittels Niedrigimpulslüftung (Zuluftöffnungen in rot und Abluftöffnungen in blau)

2.4. Sitzaktivierung

In der Simulation wird angenommen, dass der Sitz sowohl heizen als auch lüften kann. Für die Heizung wird von einstellbaren Heizdrähten im Sitz ausgegangen, sodass hier eine Oberflächentemperatur des Sitzes geregelt werden kann. Für die Kühlung wird angenommen, dass Raumluft durch einen Lüfter in Verteilkanäle im Sitzpolster gelangt und durch einen durchlässigen Bezug den Sitz- und Rückenbereich kühlt. Hierdurch entsteht ein höherer lokaler Wärmeübergangskoeffizient am Passagier.

2.5. Simulationsergebnisse

Konzepte 2 und 4 zeigen sowohl in den Kühl- als auch Heizfällen eine zu hohe Temperaturschichtung. Basierend auf den Simulationen der Lüftungskonzepte für die verschiedenen Randbedingungen wird vorgeschlagen, die Konzepte 1 und 3 zu implementieren. Da hierbei die gleichen Zu- und Abluftöffnungen verwendet werden, könnte eine ähnliche Konfiguration wie in der Business Jet Kabine implementiert werden, die je nachdem, ob ein Kühl- oder Heizfall vorliegt, durch Klappen variabel die Lüftungsform anpassen kann.

Wie TAB 2 zu entnehmen ist, kann im Heizfall durch eine Sitzbeheizung die Zulufttemperatur um 1.5 K gesenkt werden. Im Kühlfall führt die Sitzbelüftung zu einer verringerten Schichtung. Es zeigt sich, dass die Lüftungsform eine gewisse Toleranz im Übergang zwischen Heiz- und Kühlfall besitzt; bei 0 °C zeigen beide Konzepte ähnliche Ergebnisse bzgl. der Lufttemperaturschichtung. Der nach ASHRAE 161 geforderte Zuluft Volumenstrom von 37,6 l/s ist ausreichend, um ein komfortables Raumklima zu erreichen. Durch höhere Volumenströme wird die Temperaturschichtung im Raum geringer, jedoch werden das Zugluftisiko und die Energie, die zur Temperierung der Luft erforderlich ist, erhöht.

TAB 2. Vergleich der Simulationsergebnisse verschiedener Lüftungskonzepte

Ergebnisse der Simulationen zum Vergleich der Lüftungskonzepte	Außentemperatur [°C]	Solarstrahlung [W/m ²]	Sitz	Zuluft Volumenstrom [l/s]	Zuluft Temperatur [°C]	Temp. Kopf [°C]	Temp. Fuß [°C]	Schichtung [K]
Quelllüftung im Heizfall (Konzept 1)	-20	0	Passiv	37,6	21,2	23,2	20,9	2,3
	-20	0	35°C	37,6	19,7	23,3	19,6	3,7
	0	0	Passiv	37,6	17,9	23,1	19,6	3,5
Niedrigimpuls-lüftung im Kühlfall (Konzept 3)	0	0	Passiv	37,6	17,9	24,2	20,6	3,6
	40	900	Passiv	37,6	16,0	26,7	23,5	3,2
	40	900	10,0 l/s	37,6	16,0	26,9	24,1	2,8

3. DEMONSTRATORAUFBAU

Der Demonstrator wird aus Kostengründen in Holzständerbauweise gebaut. Es wird allerdings darauf geachtet, den korrekten Wärmedurchgangskoeffizienten einzuhalten. Zu- und Abluftöffnungen werden im Decken- und Sockelbereich des Demonstrators integriert (BILD 6). Die Geometrie ist einer eVTOL Passagierkabine nachempfunden.



BILD 6. Innenansicht des eVTOL Klimademonstrators

Die Fenstereinfassung ist so ausgeführt, dass die Scheiben während der Versuche gewechselt werden können

(BILD 7). Hierdurch können unterschiedliche Verglasungseigenschaften miteinander experimentell verglichen werden. Um die Scheibenauswahl zu vereinfachen, wurden die Fensteröffnungen eben konstruiert. Das Lüftungsrohr für die Deckenauslässe verläuft innerhalb des Wandaufbaus.



BILD 7. Außenansicht des eVTOL Klimademonstrators

4. NÄCHSTE SCHRITTE

Als nächster Schritt wird der Demonstrator in den Klimakammern des Fraunhofer IBP charakterisiert und Messungen zur Validierung der Simulation werden durchgeführt. Für die warme Versuchsumgebung (40 °C, 900W Strahlung) steht das Indoor Air Test Center (IATC, BILD 8 mit einer Sonnenwärmenachbildung zur Verfügung. Für die kalte Versuchsrandbedingung (-20 °C, 0 °C) wird derzeit die Fahrzeug-Kälteprüfkammer angepasst. (BILD 9).



BILD 8. Indoor Air Test Center (IATC) mit Nachbildung solaren Wärmeeintrags



BILD 9. Fahrzeugtieftiefkältekammer mit integrierten Plattenwärmetauschern zur Konditionierung

5. DANKSAGUNG

Dieses Vorhaben wird ermöglicht durch die Förderung des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie im Bayerischen Luftfahrtforschungsprogramm - Holistische Air Mobility Initiative Bayern unter dem Förderkennzeichen HAM-2208-0027. Die Autoren sind für den Inhalt der Publikation verantwortlich.

Gefördert durch:



Bayerisches Staatsministerium für
Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie

6. REFERENZEN

ASHRAE 161: Air quality within commercial aircraft, ASHRAE Standard 161, 2006 Babetto L, König R., Fassnach J., Stumpf E.: Study on public acceptance of eVTOL: safety & noise, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2023, 19.-21. September 2023, Stuttgart, Deutschland

DIN EN ISO 7730: Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit, 2006

Jahn, P.: Modellbasierte Applikation der Klimaregelung für thermischen Komfort im Fahrzeug, Dissertation an der TU-München, 2021

Krenzler, M., Schmitt, M. und Stumpf, E.: Conceptual design study on electrical vertical takeoff and landing aircraft for Urban Air Mobility applications, AIAA Aviation 2019 Forum, 17-21 Juni 2019, Dallas, Texas, <https://doi.org/10.2514/6.2019-3124>

Lahlou, A.; Ossart, F.; Boudard, E.; Roy, F.; Bakhouya, M. Optimal Management of Thermal Comfort and Driving Range in Electric Vehicles. *Energies* 2020, 13, 4471.

Norrefeldt, V., Grün, G., & Sedlbauer, K. Velocity propagating zonal model for the estimation of the airflow pattern and temperature distribution in a confined space. *Building and Environment*, 48, 2012

Norrefeldt V., Pathak A., Lemouedda A., Siede M., Grün G.: Validation of the zonal thermal model VEPZO/RADZO for cold outside conditions on a business jet mock-up, AST 2015, February 24–25, Hamburg, Germany

Pathak, A., Norrefeldt, V., Lemouedda, A., Grün, G.: The Modelica Thermal Model Generation Tool for Automated Creation of Coupled Airflow, Radiation Model and Wall Model in Modelica, 10th Modelica Conference, 10.-12. March 2014, Lund, Sweden

Prince, G., Helton, D.: Urban Air Mobility Operational Concept (OpsCon) Passenger-Carrying Operations, NASA/CR—2020–5001587, Mai 2020

Zhou, X., Lai, D., and Chen, Q.: Experimental investigation of thermal comfort in a passenger car under driving conditions, *Building and Environment*, 149: 109–119, 2019