Master Thesis

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Reverse Engineering of Passenger Jets – Classified Design Parameters

Emiel De Grave

Examiner: Prof. Dr.-Ing Dieter Scholz, MSME

August 2017

Erasmus Hamburg (Germany)

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Master Thesis

Reverse Engineering

Passenger Jets

Classified

Design Parameters

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Design Parameters

Maximum lift coefficient: $C_{L,max}$

- Landing
- Take-off

Lift-to-drag ratio: E

Specific fuel consumption: SFC

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Content

1. Preliminary Sizing of Passenger Aircraft
2. Concept Reverse Engineering
3. Reverse Engineering of Preliminary Sizing
4. Tool
5. Example

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Preliminary Sizing of Passenger Aircraft

Aircraft design parameters

- Take-off mass
- Fuel mass
- Operating empty mass
- Wing area
- Take-off thrust

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

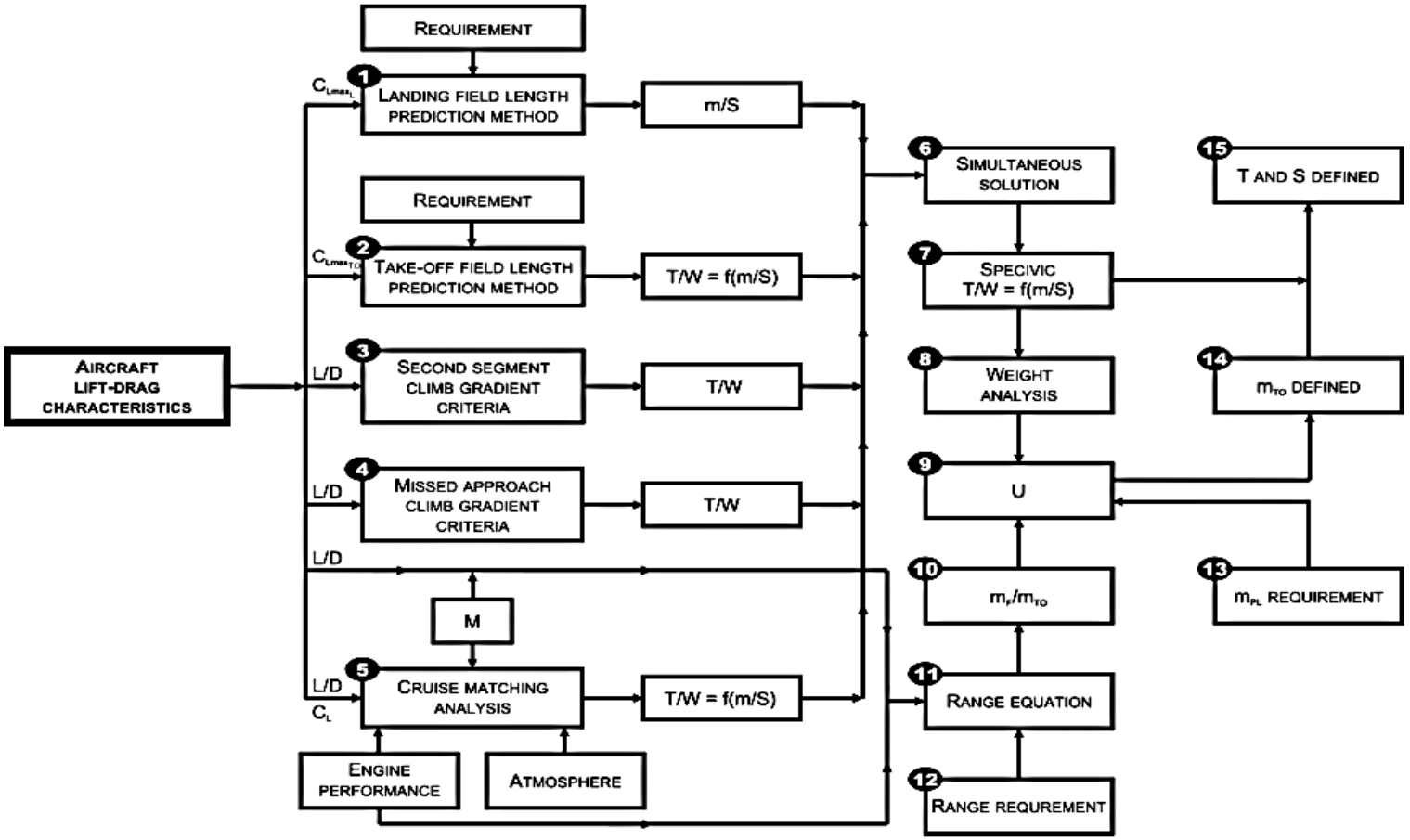
Preliminary Sizing of Passenger Aircraft

1. Landing
2. Take-off
3. Second Segment
4. Missed Approach
5. Cruise

Acc. to Federal Air Regulations (FAR Part 25)

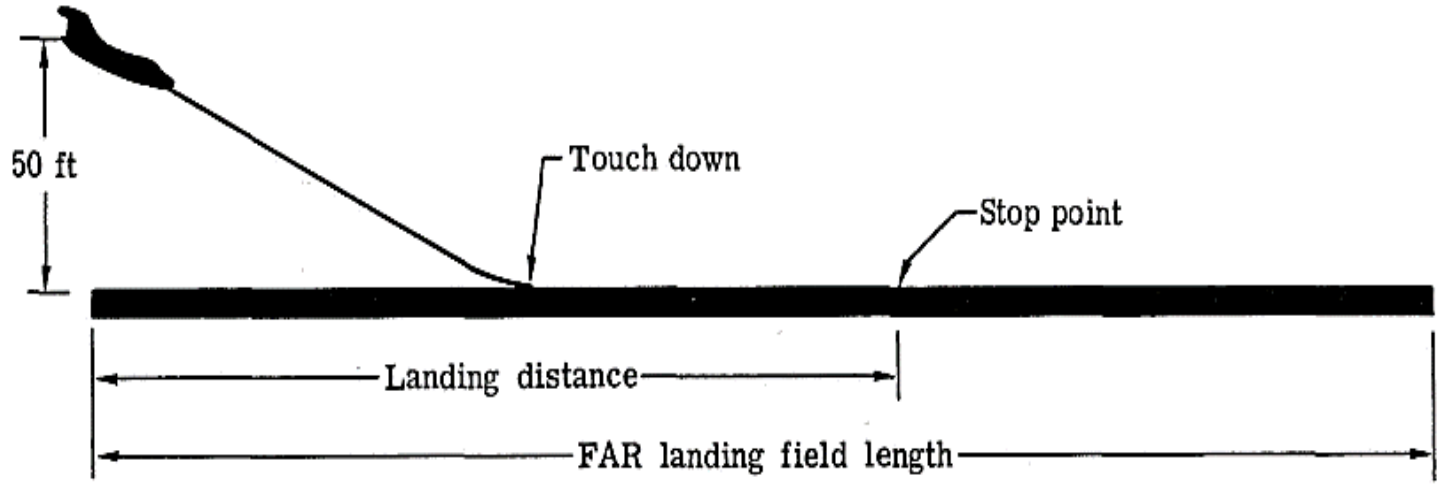
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Preliminary Sizing of Passenger Aircraft



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

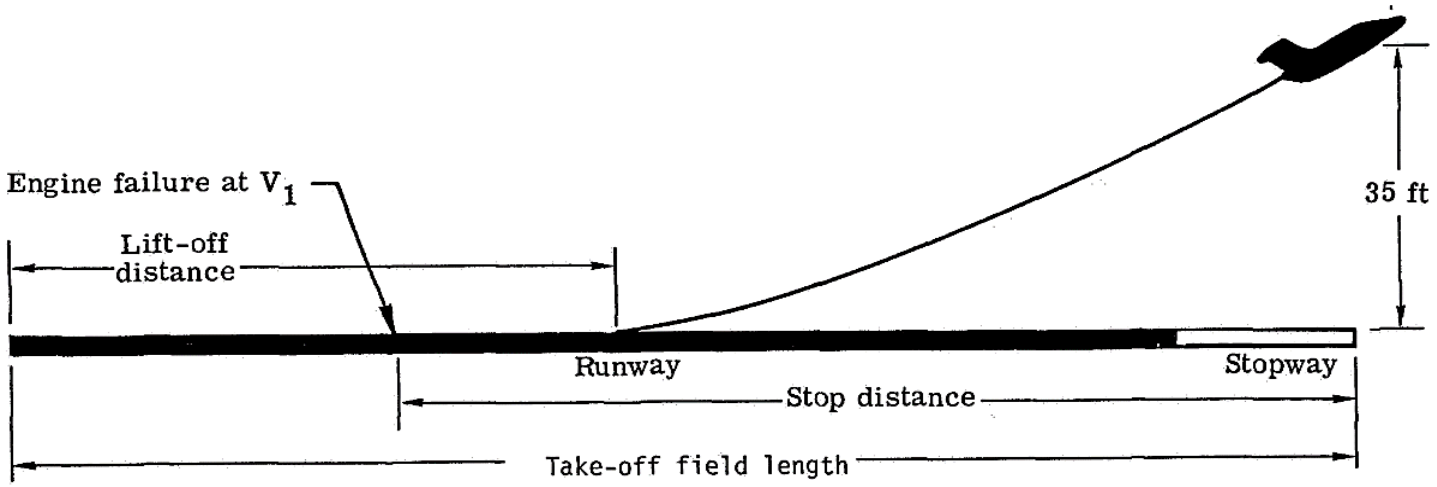
Preliminary Sizing – Landing



$$\frac{m_{MTO}}{S_W} = k_L \cdot \sigma \cdot s_{LFL} \cdot C_{L,max,L} \cdot \frac{m_{MTO}}{m_{ML}}$$

$$k_L = 0{,}107\ kg/m^3$$

Preliminary Sizing – Take-Off



$$\frac{T_{TO}}{m_{TO} \cdot g} = \frac{k_{TO}}{\sigma \cdot C_{L,max,TO} \cdot s_{TOFL}} \frac{m_{TO}}{S_W} = a \cdot \frac{m_{TO}}{S_W}$$

$$a = \frac{k_{TO}}{\sigma \cdot C_{L,max,TO} \cdot s_{TOFL}}$$

$$k_{TO} = 2{,}34\ m^3/kg$$

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Preliminary Sizing – 2nd Segment

Start: retracted landing gear

End: altitude of 400 ft

Flaps: take-off configuration

Req.: minimum climb gradient can be maintained (with 1 inoperative engine)

$$\frac{T_{TO}}{m_{MTO} \cdot g} = \frac{n_E}{n_E - 1}\left(\frac{1}{E} + \sin\gamma_{CLB}\right)$$

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Preliminary Sizing – Missed Approach

Abort landing → climb & turnaround

Flaps: landing configuration + extended landing gear

Req.: minimum climb gradient can be maintained (with 1 inoperative engine)

$$\frac{T_{TO}}{m_{MTO} \cdot g} = \frac{n_E}{n_E - 1}\left(\frac{1}{E} + \sin\gamma_{MA}\right)\left(\frac{m_{ML}}{m_{MTO}}\right)$$

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Preliminary Sizing – Cruise

1. Thrust-to-weight ratio

Designed to reach destination (range)

Breguet range eq.:

$$R = \frac{V_{CR} \cdot E}{SFC} \cdot ln\left(\frac{1}{1 - \frac{m_F}{m}}\right)$$

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Preliminary Sizing – Cruise

1. Thrust-to-weight ratio

→ **Fly at minimum drag speed: V_{md} (E_{max})**

→ **Fly at max. range speed: V**

$$\frac{T_{MTO}}{m_{MTO} \cdot g} = \frac{1}{\left(\frac{T_{CR}}{T_{TO}}\right) \cdot E}$$

$$\frac{T_{CR}}{T_{TO}} = (0{,}0013\mu - 0{,}0397)\frac{1}{km} \cdot h_{CR} - 0{,}0248\mu + 0{,}7125$$

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Preliminary Sizing – Cruise

2. Wing loading

Cruise: lift = weight

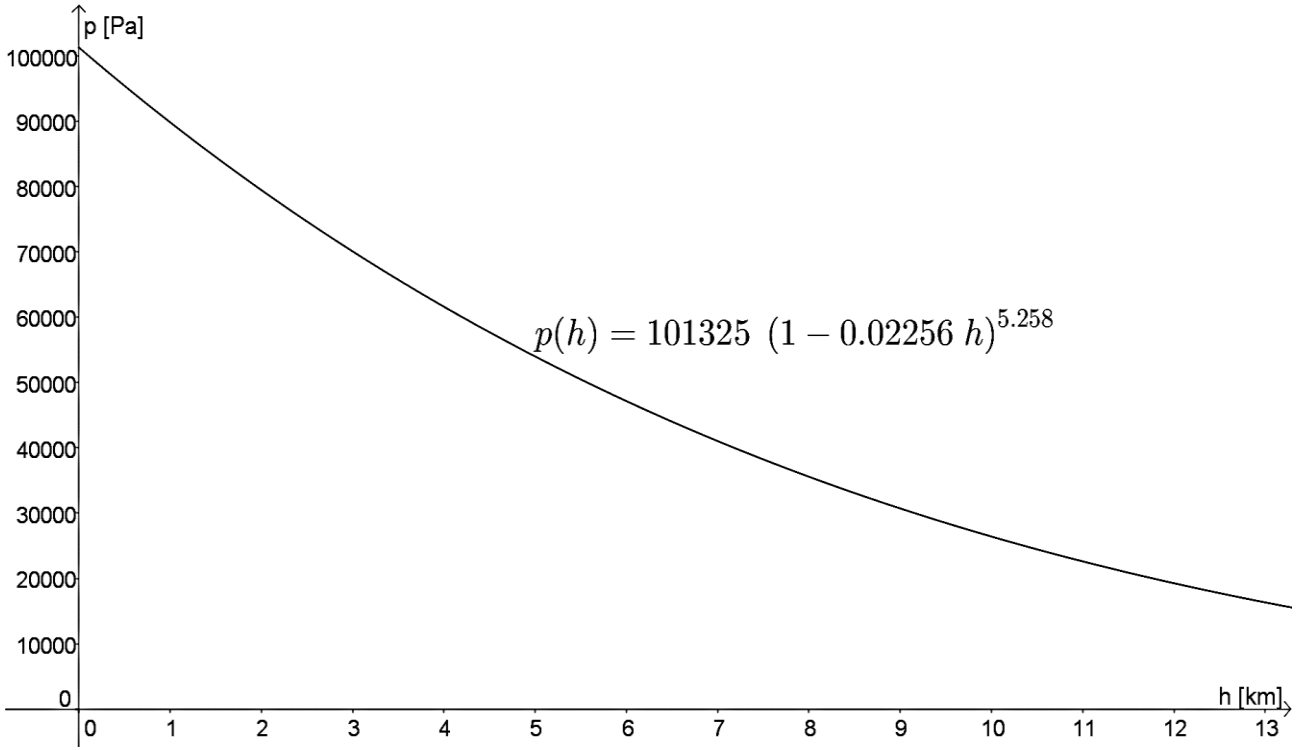
$$\frac{m_{MTO}}{S_W} = \frac{C_L \cdot M^2}{g} \cdot \frac{\gamma}{2} \cdot p(h)$$

$$\gamma = 1{,}4$$

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

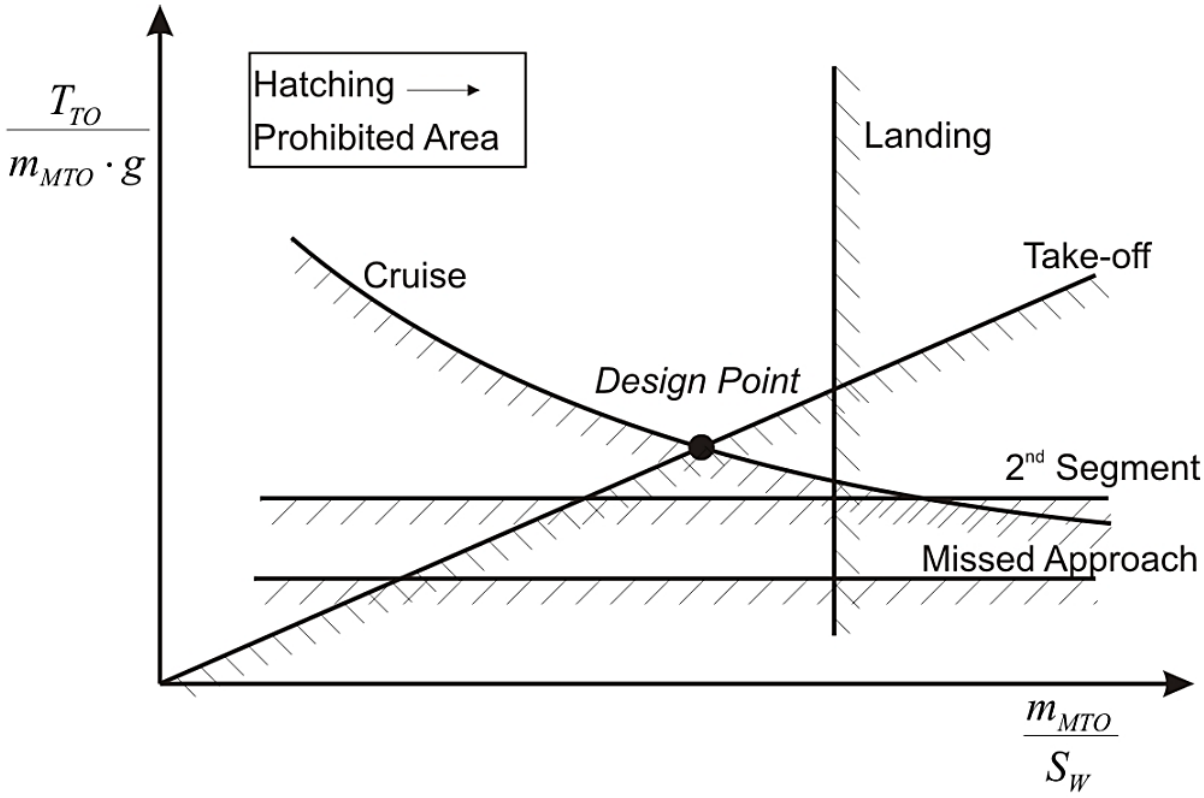
Preliminary Sizing – Cruise

2. Wing Loading



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Preliminary Sizing – Matching Chart



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Concept Reverse Engineering

Def.: RE is a proces, used to understand the working of a product and to analyze its design

Provides documentation:

- **Specifications**
- **Mechanisms**
- **Materials**
- **Manufacturability**
- **Assembly details**

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Concept Reverse Engineering

RE is applied when technical data is:

- **Lost**
- **Not exising**
- **Property of another manufacturer**

Note: copyright!

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Concept Reverse Engineering

Black-box (hypothetical)

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

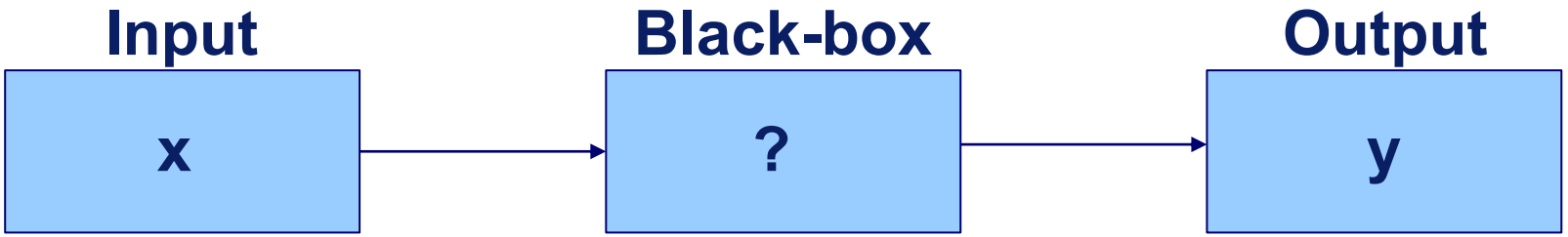
Concept Reverse Engineering

Black-box (hypothetical)

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Concept Reverse Engineering

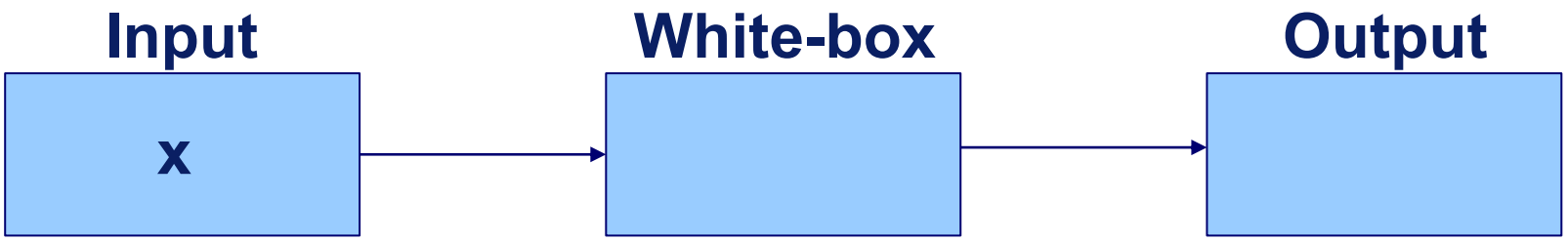
Black-box (hypothetical)



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Concept Reverse Engineering

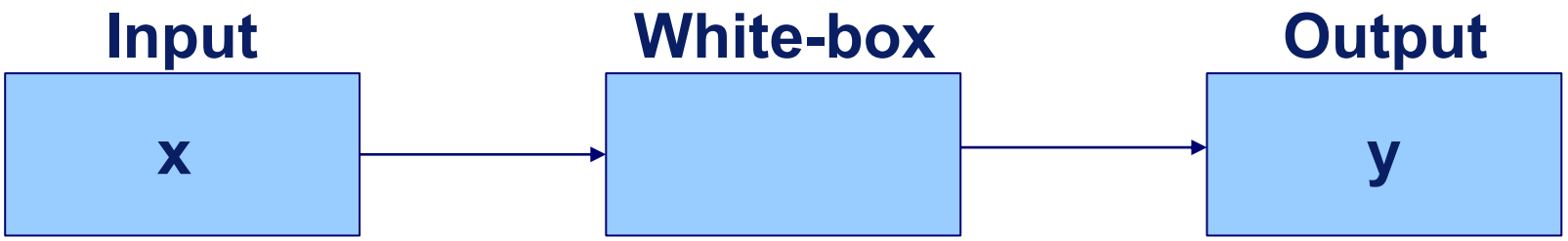
White-box



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Concept Reverse Engineering

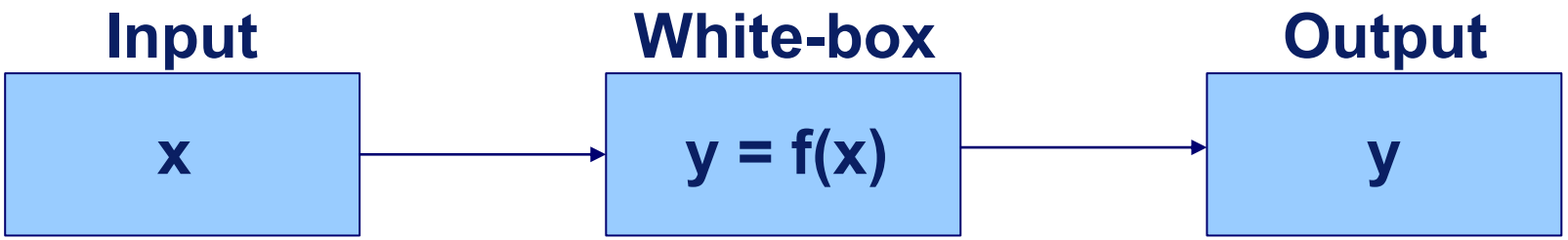
White-box



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Concept Reverse Engineering

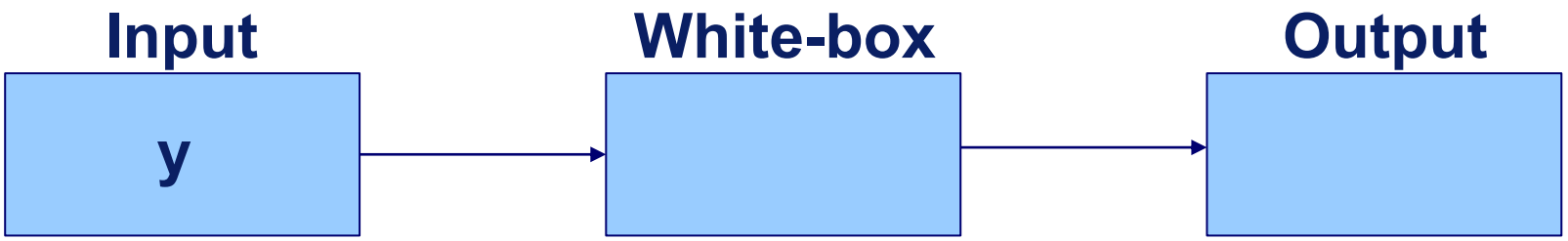
White-box



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Concept Reverse Engineering

RE white-box



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

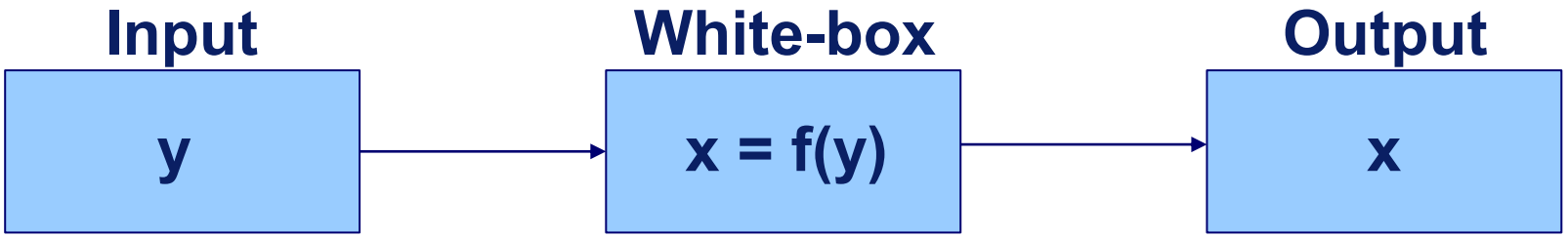
Concept Reverse Engineering

RE white-box

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Concept Reverse Engineering

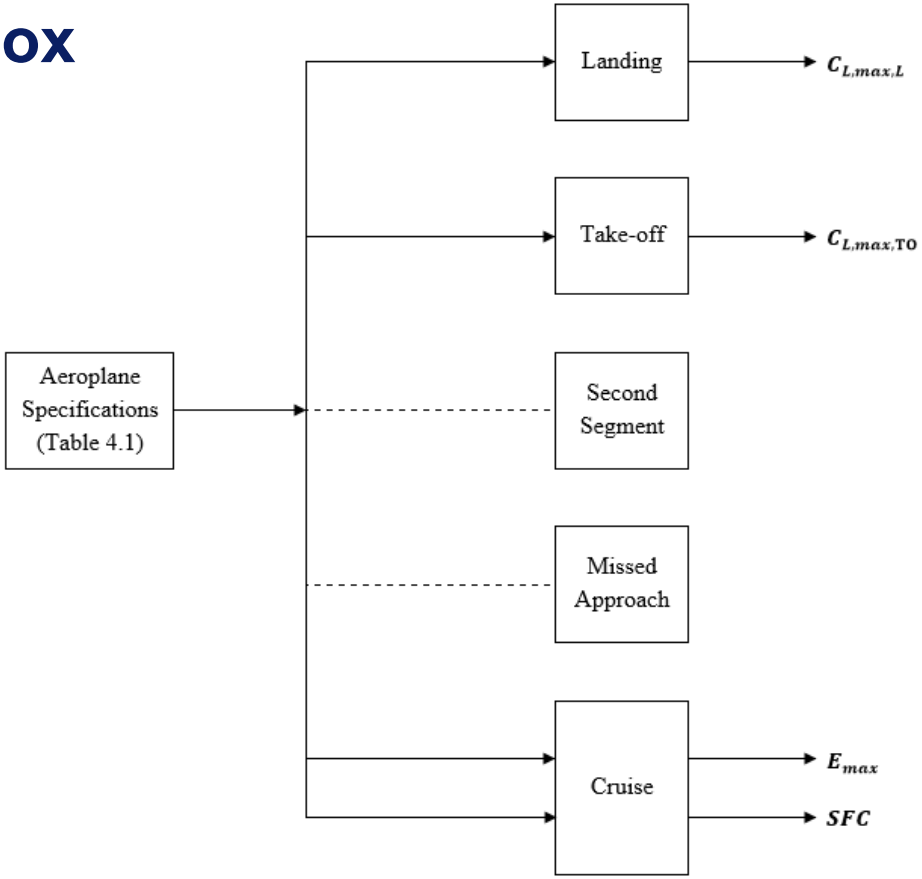
RE white-box



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Reverse Engineering of Preliminary Sizing

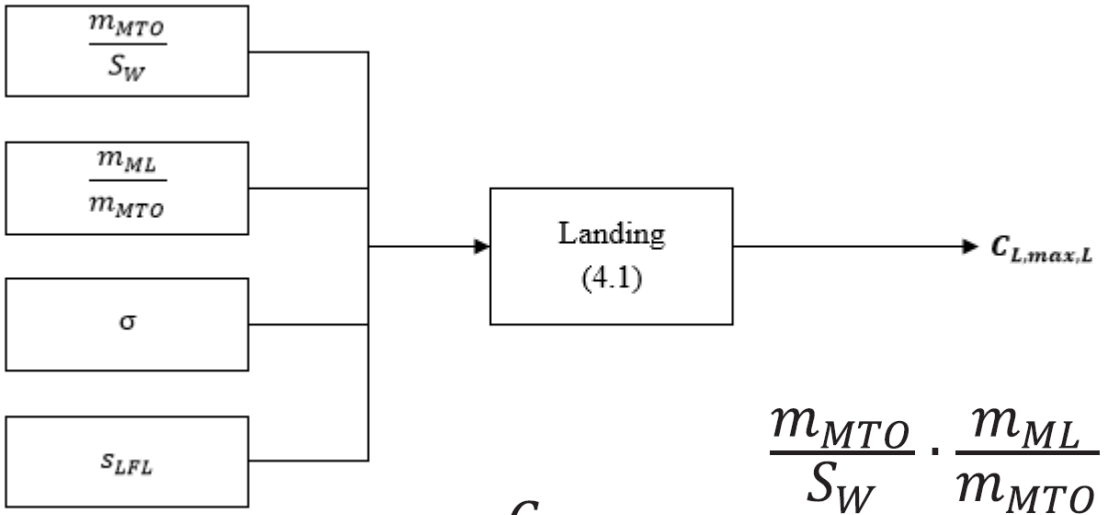
RE Black-box



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Reverse Engineering of Preliminary Sizing

RE white-box 1



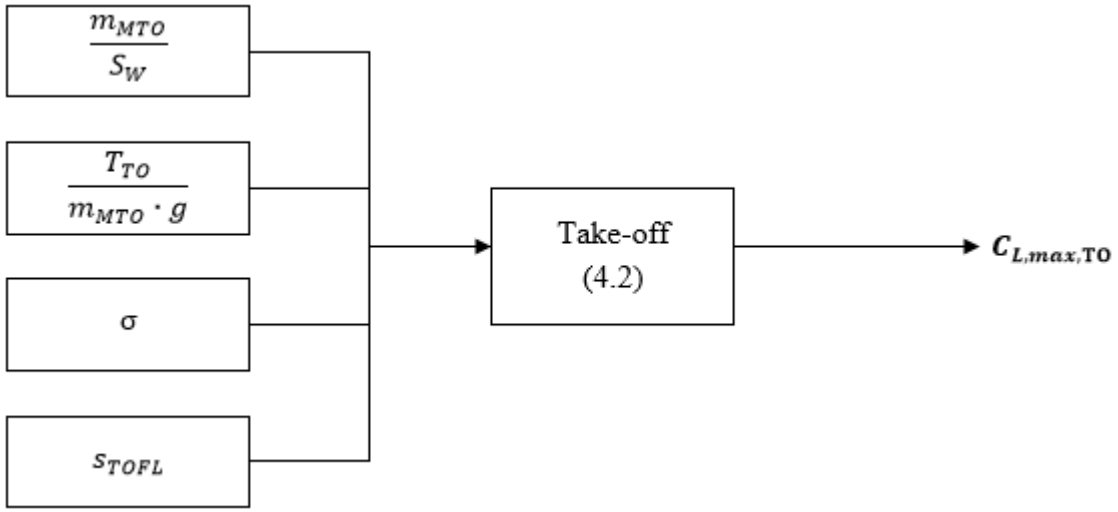
$$C_{L,max,L} = \frac{\frac{m_{MTO}}{S_W} \cdot \frac{m_{ML}}{m_{MTO}}}{k_L \cdot \sigma \cdot s_{LFL}}$$

$$k_L = 0{,}107\ kg/m^3$$

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Reverse Engineering of Preliminary Sizing

RE white-box 2

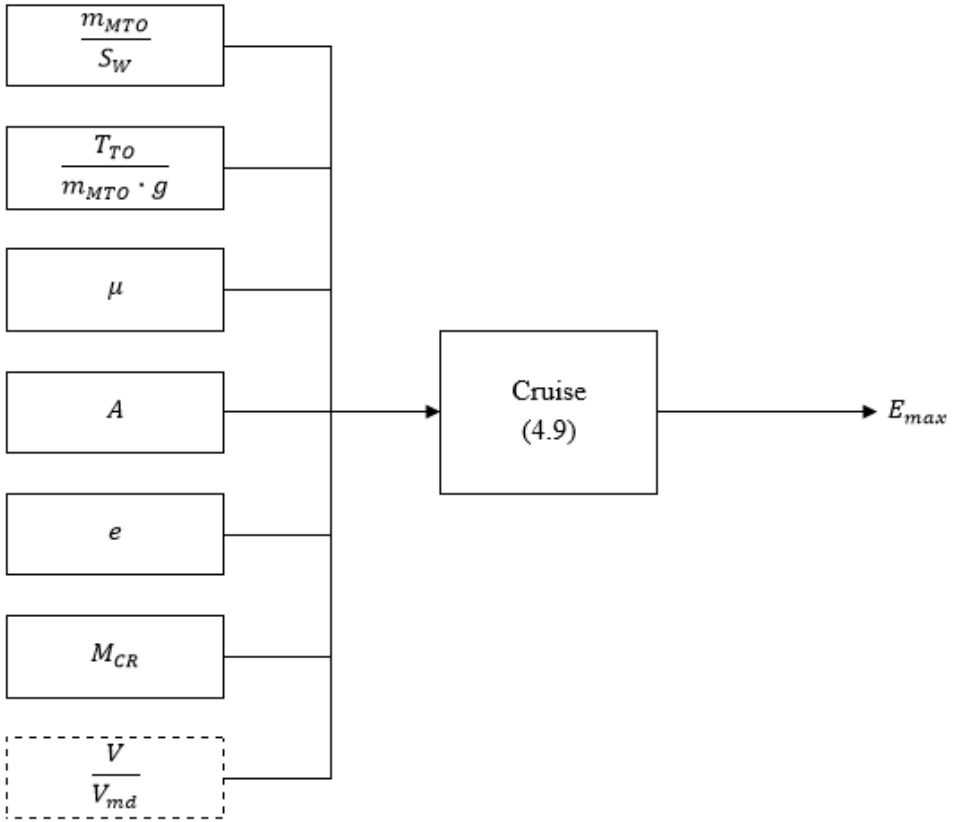


$$C_{L,max,TO} = \frac{k_{TO}}{\sigma \cdot s_{TOFL}} \cdot \frac{m_{MTO}/S_W}{T_{TO}/m_{TO} \cdot g}$$

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Reverse Engineering of Preliminary Sizing

RE white-box 3



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Reverse Engineering of Preliminary Sizing

RE white-box 3

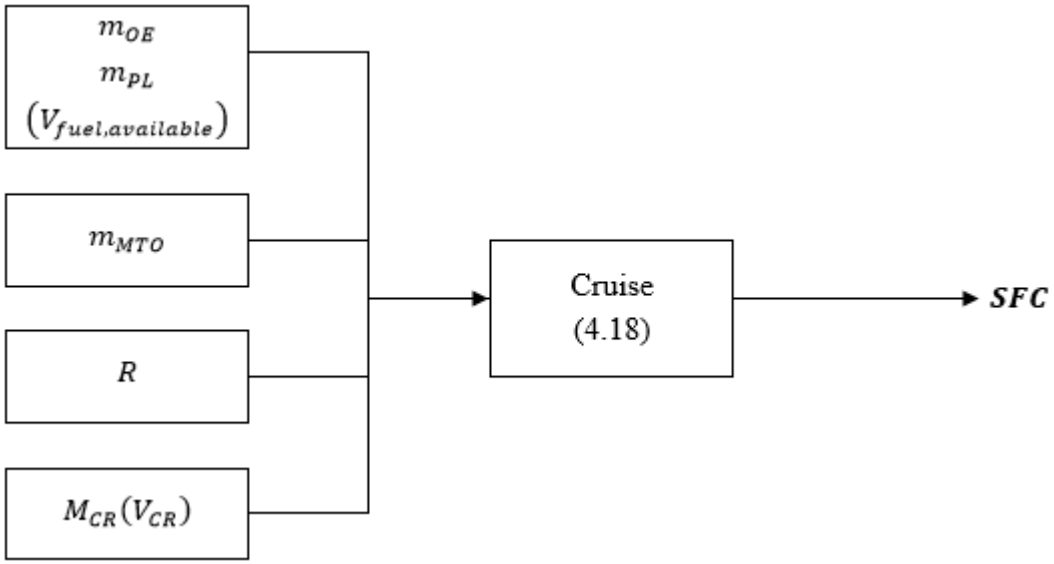
$$\frac{2 \cdot \frac{T_{TO}}{m_{MTO} \cdot g}}{\frac{1}{\left(\frac{V}{V_{md}}\right)^2} + \left(\frac{V}{V_{md}}\right)^2} \left[E_{max}^{1,19} \cdot (0{,}0576\mu - 1{,}76) \cdot \left(\frac{4 \cdot g \cdot \frac{m_{MTO}}{S_W} \cdot \left(\frac{V}{V_{md}}\right)^2}{\pi \cdot A \cdot e \cdot M^2 \cdot \gamma \cdot p_0} \right)^{\frac{1}{5{,}258}} \right]$$

$$+ \frac{2 \cdot \frac{T_{TO}}{m_{MTO} \cdot g}}{\frac{1}{\left(\frac{V}{V_{md}}\right)^2} + \left(\frac{V}{V_{md}}\right)^2} \cdot (-E_{max}) \cdot (0{,}0328\mu - 1{,}05) + 1 = 0$$

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Reverse Engineering of Preliminary Sizing

RE white-box 4



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Reverse Engineering of Preliminary Sizing

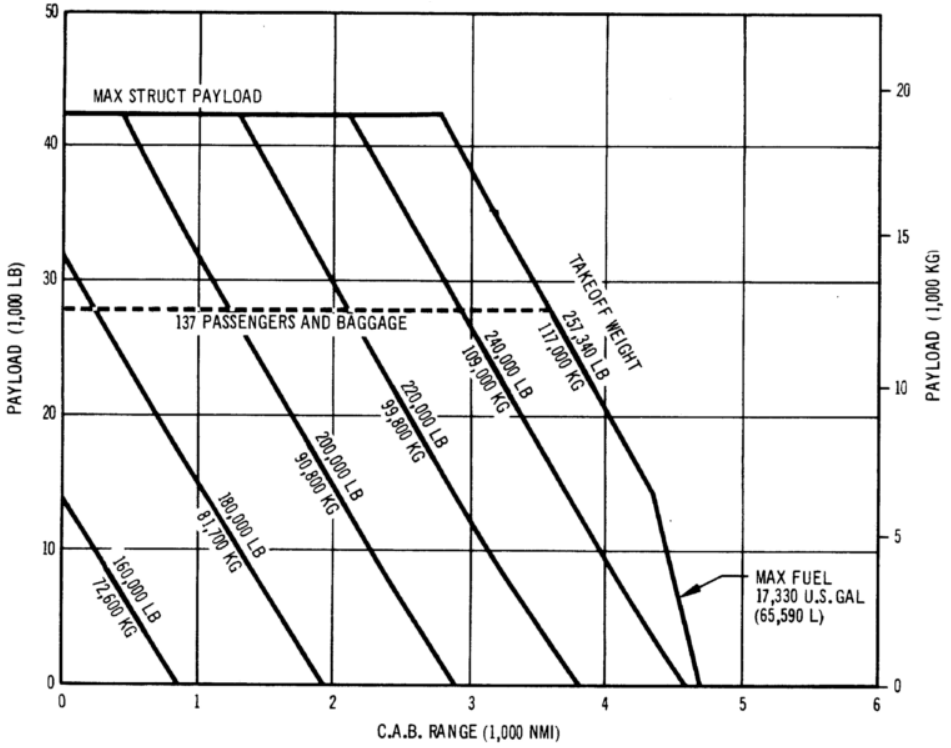
RE white-box 4

$$SFC = -\frac{E \cdot ln\left(\frac{\frac{m_{PL}}{m_{MTO}} + \frac{m_{OE}}{m_{MTO}}}{M_{ff,TO} \cdot M_{ff,CLB}^2 \cdot M_{ff,DES}^2 \cdot M_{ff,L}}\right)}{g \cdot \left(\frac{R + s_{RES}}{V_{CR}} + t_{loiter}\right)}$$

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Reverse Engineering of Preliminary Sizing

RE white-box 4



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Reverse Engineering of Preliminary Sizing

RE white-box 4

$$SFC = -\frac{E \cdot ln\left(\frac{1 - \frac{V_{fuel,capacity} \cdot \rho_{fuel}}{m_{MTO}}}{M_{ff,TO} \cdot M_{ff,CLB}^2 \cdot M_{ff,DES}^2 \cdot M_{ff,L} \cdot M_{ff,engine\ start} \cdot M_{ff,taxi}}\right)}{g \cdot \left(\frac{R + s_{RES}}{V_{CR}} + t_{loiter}\right)}$$

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

The Tool

Necessity due to complexity:

- **Amount of variables**
- **Mutual relations**
- **Numerical iteration**
- **Optimization solver**

→ Tool: PJRE (Passenger Jet Reverse Engineering)

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

The Tool

Requirements of PJRE

- Accurate results
- Reliable results
- Quick
- User friendly
- Multifunctional
- Direct print-out

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

The Tool

Build-up

1. Specs + RE
2. C_Lmax
3. E_max
4. SFC
5. Matching Chart
6. Data
7. Verification

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

The Tool

Demonstration A320-200 (Airbus)

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Example BAe 146-200 (British Aerospace)

Example BAe 146-200 (British Aerospace)

Google: 'Airport planning' + aircraft manufacturer

https://www.skybrary.aero/index.php/Category:Aircraft

https://booksite.elsevier.com/9780340741528/appendices/data-a/default.htm

https://booksite.elsevier.com/9780340741528/appendices/data-b/default.htm

http://www.jet-engine.net/

Note: mission fuel fraction for climb = 0,998!

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Example BAe 146-200 (British Aerospace)

- $C_{L,max,L}$ = 3,62
- $C_{L,max,TO}$ = 2,63
- E_{max} = 14,5
- SFC = 19,5 mg/N/s

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Example BAe 146-200 (British Aerospace)

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

PJRE

Positive

- Quick
- Reliable
- Accurate
- Multifunctional
- Reduces complexity
- User friendly

Negative

- Only (large) passenger jets
- Sensitive to human error
- Critical view

emiel_dg@hotmail.com