

# Design of Simulation Experimente

Prof. Dr. Olaf Tietje, FHO Hochschule für Technik, Rapperswil

10 Mai 2018

# DoE und numerische Experimente

DoE

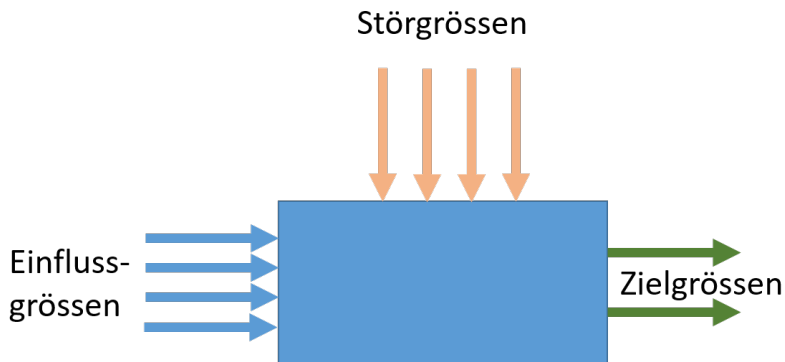
= Design of Experiments

= Statistische Versuchsplanung

DoSE

= Design of Simulation Experiments

= DoE und numerische Experimente



# Sinn und Unsinn der Versuchsplanung

- ▶ Nachteile
  - Versuchsplanung kostet Zeit
  - Versuchsplanung kostet Know-how
  - Wenn nur ein paar Simulationen nötig sind, lohnt sich der Aufwand nicht
- ▶ Bedingungen
  - Was habe ich für Hilfsmittel?
  - Wer kann mir helfen, wenn ich nicht weiterkomme?
- ▶ Vorteile
  - Versuchsplanung ist cool, Versuchspläne sind “schön”
  - Warum soll ich 3 Tage Simulationen machen, wenn ich nach einem halben Tag Planung und einem halben Tag Simulationen schon fertig sein kann?

## Beispiel

- ▶ 4 Faktoren mit nichtlinearen Wirkungen
  - => mindestens 3 Ausprägungen je Faktor
  - => mehr als  $3^4 = 81$  Simulationen
- ▶ eine Simulation dauert eine halbe Stunde (inkl. Vorbereitung, Durchführung, Zusammenstellung der Ergebnisse )
  - => Simulationsaufwand =  $3^4 \cdot 0.5 = 40.5$  Stunden, also etwa eine Woche.
- ▶ Versuchsplanung:
  - Ziel festlegen (30 Min)
  - Versuchsplan erstellen (2 Stunden)
  - ca. 10 Simulationen durchführen (5 Stunden, ca. 90 Prozent der Simulationen einsparen)
  - Versuchsplan auswerten (2-3 Stunden)
  - => Aufwand  $0.25 + 2 + 5 + 2.5 = 10$  Stunden, also zwei Arbeitstage (inkl. Kaffeepausen, Mittagessen, Sonnen am See, Eis essen, Erstellen und Drucken des Berichts).

# Voraussetzungen

- ▶ Grundlagen des DoE kennen
- ▶ Software zum Erstellen des Versuchsplans
- ▶ Grundlagen Statistik kennen (braucht man aber auch bei der Ochsentour ohne DoE)
- ▶ Varianzanalyse kennen
- ▶ Regressionsanalyse kennen
- ▶ Sonnencreme, Taschengeld

# Beispiel für die statistische Versuchsplanung (DoSE)

Beispiel Modell COMLEAM: Modell zur Berechnung von Stofffrachten an berechneten Bauteilen.

- ▶ Eingangsparameter = Einflussfaktoren:
  - Niederschlagsmenge  $N$
  - mittlere Windgeschwindigkeit  $v$
  - Expositionsrichtung  $d$
  - charakteristische Emission  $a_{char}$
  - charakteristischer Abfluss  $r_{char}$
  - Fassadenhöhe  $h$
  - Abflussbeiwert  $\psi$
- ▶ Zielgrößen
  - Emissionsfracht
  - Grenzwertüberschreitungen
- ▶ Störgrösse: Numerischer Rechenfehler

## Beispiel (Fortsetzung)

- $N$  halbe/totale Niederschlagsmenge
- $v$  mittlere/doppelte mittlere Windgeschwindigkeit
- $d$  Ost, West
- $a_{char}, r_{char}$  charakteristische Emissionsparameter (s.u.)
- $h$  Fassadenhöhe OECD Haus 2.5 m, Hochhaus 14 m
- $\psi$  Abflussbeiwert

Der Standortfaktor  $\alpha = C_R \cdot C_T \cdot O \cdot W$  ist das Produkt von

- Geländerauheitsfaktor  $C_R$ ,
- Topographiefaktor  $C_T$ ,
- Versperrungsfaktor (Obstruktionsfaktor)  $O$  und
- Wandfaktor  $W$ .

Diese Faktoren beeinflussen den Standortfaktor gemeinsam und müssen daher nicht einzeln betrachtet werden. Der Wandfaktor  $W$  hängt von der Fassadenhöhe ab.

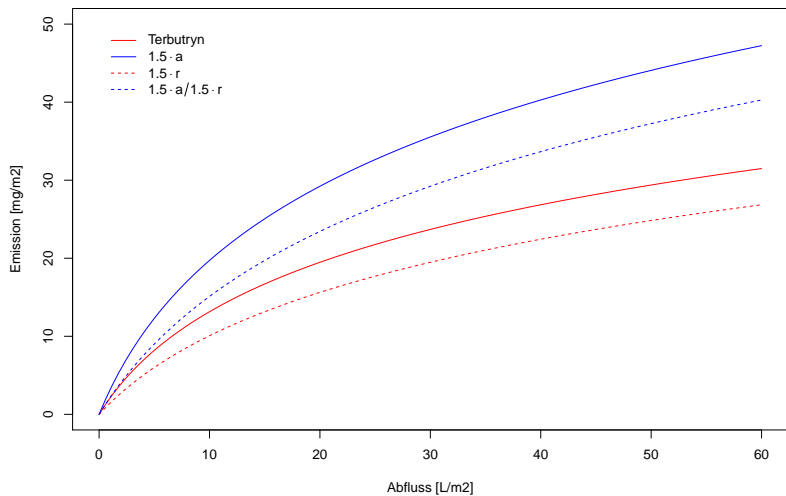
## Beispiel (2. Fortsetzung)

Tabelle 1: Faktoren und Ausprägungen

| Einflussgrösse | Einheit           | Faktorwerte | Ausprägungen   |
|----------------|-------------------|-------------|----------------|
| N              | mm                | -1, +1      | 788.75, 1577.5 |
| v              | m/s               | -1, +1      | 1.2, 2.4       |
| d              | Grad              | -1, +1      | 90, 270        |
| $a_{char}$     | $mg \cdot m^{-2}$ | -1, +1      | 12.7, 19.1     |
| $r_{char}$     | $L \cdot m^{-2}$  | -1, +1      | 9.5, 14.3      |
| $h$            | $m$               | -1, +1      | 2.5, 14        |
| $\psi$         | dimensionslos     | -1, +1      | 0.5, 0.9       |



# Emissionsfunktion



# Fraktioneller Versuchsplan $2^{n-p} = 2^{7-4}$ mit Auflösung IV

|    | A  | B  | C  | D  | E  | F  | G  |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 2  | -1 | 1  | 1  | 1  | 1  | -1 | -1 |
| 3  | 1  | -1 | 1  | 1  | -1 | 1  | -1 |
| 4  | -1 | -1 | 1  | 1  | -1 | -1 | 1  |
| 5  | 1  | 1  | -1 | 1  | -1 | -1 | 1  |
| 6  | -1 | 1  | -1 | 1  | -1 | 1  | -1 |
| 7  | 1  | -1 | -1 | 1  | 1  | -1 | -1 |
| 8  | -1 | -1 | -1 | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 9  | 1  | 1  | 1  | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 10 | -1 | 1  | 1  | -1 | -1 | 1  | 1  |
| 11 | 1  | -1 | 1  | -1 | 1  | -1 | 1  |
| 12 | -1 | -1 | 1  | -1 | 1  | 1  | -1 |
| 13 | 1  | 1  | -1 | -1 | 1  | 1  | -1 |
| 14 | -1 | 1  | -1 | -1 | 1  | -1 | 1  |
| 15 | 1  | -1 | -1 | -1 | -1 | 1  | 1  |
| 16 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |

## Fraktioneller Versuchsplan $2^{n-p} = 2^{7-4}$ mit Auflösung IV

$n=7$  Anzahl Faktoren insgesamt(ABCDEFG)

$p=3$  Anzahl hinzugefügter Faktoren(EFG)

$k=4$  Anzahl Vollfaktoren (ABCD)

$m=16$  Anzahl Experimente

---

Der Versuchsplan entsteht dadurch, dass zunächst für die ersten  $k = 4$  Faktoren (*Vollfaktoren*) ein vollständiger Versuchsplan erzeugt wird (alle Kombinationen kommen vor). Für den Faktor E werden als Faktorausprägungen die Ausprägungen der Faktoren BCD miteinander multipliziert. Die hinzugefügten Faktoren sind:

$$E = B \cdot C \cdot D$$

$$F = A \cdot C \cdot D$$

$$G = A \cdot B \cdot D$$

# Kontrolle des Versuchsplans

Korrelationsmatrix:

|   | A | B | C | D | E | F | G |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| E | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| F | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| G | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

## Tabelle der Ausprägungen

|   | -1     | +1      |
|---|--------|---------|
| Niederschlagsmenge [mm]                         | 788.75 | 1577.50 |
| mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]              | 1.20   | 2.40    |
| Expositionsrichtung [Grad]                      | 90.00  | 270.00  |
| charakteristische Emission [mg/m <sup>2</sup> ] | 12.74  | 19.12   |
| charakteristischer Abfluss [L/m <sup>2</sup> ]  | 9.53   | 14.29   |
| Fassadenhöhe [m]                                | 2.50   | 14.00   |
| Abflussbeiwert []                               | 0.50   | 0.90    |

## Versuchsplan mit Faktorausprägungen

|    | N       | v   | d   | a_char   | r_char    | h    | A   |
|----|---------|-----|-----|----------|-----------|------|-----|
| 1  | 1577.50 | 2.4 | 270 | 19.11696 | 14.287796 | 14.0 | 0.9 |
| 2  | 788.75  | 2.4 | 270 | 19.11696 | 14.287796 | 2.5  | 0.5 |
| 3  | 1577.50 | 1.2 | 270 | 19.11696 | 9.525197  | 14.0 | 0.5 |
| 4  | 788.75  | 1.2 | 270 | 19.11696 | 9.525197  | 2.5  | 0.9 |
| 5  | 1577.50 | 2.4 | 90  | 19.11696 | 9.525197  | 2.5  | 0.9 |
| 6  | 788.75  | 2.4 | 90  | 19.11696 | 9.525197  | 14.0 | 0.5 |
| 7  | 1577.50 | 1.2 | 90  | 19.11696 | 14.287796 | 2.5  | 0.5 |
| 8  | 788.75  | 1.2 | 90  | 19.11696 | 14.287796 | 14.0 | 0.9 |
| 9  | 1577.50 | 2.4 | 270 | 12.74464 | 9.525197  | 2.5  | 0.5 |
| 10 | 788.75  | 2.4 | 270 | 12.74464 | 9.525197  | 14.0 | 0.9 |
| 11 | 1577.50 | 1.2 | 270 | 12.74464 | 14.287796 | 2.5  | 0.9 |
| 12 | 788.75  | 1.2 | 270 | 12.74464 | 14.287796 | 14.0 | 0.5 |
| 13 | 1577.50 | 2.4 | 90  | 12.74464 | 14.287796 | 14.0 | 0.5 |
| 14 | 788.75  | 2.4 | 90  | 12.74464 | 14.287796 | 2.5  | 0.9 |
| 15 | 1577.50 | 1.2 | 90  | 12.74464 | 9.525197  | 14.0 | 0.9 |
| 16 | 788.75  | 1.2 | 90  | 12.74464 | 9.525197  | 2.5  | 0.5 |

# Versuchsplan

- ▶ jede Zeile des Versuchsplans ist eine *Faktorkombination*
- ▶ zu jeder Zeile kommt eine Simulation und deren Zielgrößen

⇒ Simulationen durchführen

Simulation 1 Jahr, für jede Zeile des Versuchsplans

Zielgrößen:

- ▶ Emissionsmenge insgesamt nach einem Jahr
- ▶ Anzahl Stunden mit Grenzwertüberschreitungen in nah gelegenen Bach

⇒ Simulationsergebnisse an Versuchsplan anhängen





## Auswerten des Versuchsplans: Effekte der Faktoren

Der Effekt eines Faktors wird dadurch berechnet, dass man die Versuchsergebnisse mittelt für die Versuche, bei denen der Faktor +1 bzw. -1 ist. Die Differenz ist der Effekt.

Bei Messungen wird dieser Effekt verglichen mit der Messgenauigkeit (Standardabweichung). Bei Computersimulationen geht man davon aus, dass die Messgenauigkeit der Abweichung des Modells von den Messdaten entspricht.

|        | Emissionsmenge | Anzahl Grenzwertüberschreitungen |
|--------|----------------|----------------------------------|
| N      | 733.2175       | 41.125                           |
| v      | 1855.0025      | 100.375                          |
| d      | 1934.5200      | 71.125                           |
| a_char | 432.9600       | 28.125                           |
| r_char | 456.7475       | 18.875                           |
| h      | 2550.0925      | 129.125                          |
| A      | 1505.1650      | 92.375                           |

## Effekte Emissionsmengen

kumulative Emissionsmenge über 1 Jahr [mg/m<sup>2</sup>]

|        | -1   | +1   | Effekt | relativer Effekt [%] |
|--------|------|------|--------|----------------------|
| N      | 1807 | 2540 | 733    | 29                   |
| v      | 1246 | 3101 | 1855   | 60                   |
| d      | 1206 | 3141 | 1935   | 62                   |
| a_char | 1957 | 2390 | 433    | 18                   |
| r_char | 1945 | 2402 | 457    | 19                   |
| h      | 898  | 3449 | 2550   | 74                   |
| A      | 1421 | 2926 | 1505   | 51                   |

# Effekte Anzahl Überschreitungen

Anzahl Grenzwertüberschreitungen [Anzahl Std]

|        | -1 | +1  | Effekt | relativer Effekt [%] |
|--------|----|-----|--------|----------------------|
| N      | 50 | 91  | 41     | 45                   |
| v      | 20 | 121 | 100    | 83                   |
| d      | 35 | 106 | 71     | 67                   |
| a_char | 57 | 85  | 28     | 33                   |
| r_char | 61 | 80  | 19     | 24                   |
| h      | 6  | 135 | 129    | 95                   |
| A      | 24 | 117 | 92     | 79                   |

## Auswerten des Versuchsplans: Korrelationen

Korrelationen der Faktoren mit den Zielgrößen

|        | Emissionsmenge | Anzahl Grenzwertüberschreitungen |
|--------|----------------|----------------------------------|
| N      | 0.149          | 0.155                            |
| v      | 0.376          | 0.377                            |
| d      | 0.392          | 0.267                            |
| a_char | 0.088          | 0.106                            |
| r_char | 0.093          | 0.071                            |
| h      | 0.517          | 0.485                            |
| A      | 0.305          | 0.347                            |

## Auswerten des Versuchsplans: ANOVA

$P(>F)$  = Wahrscheinlichkeit, dass die Testgrösse durch Zufall so gross ist. Signifikant, wenn  $p < 5\%$ .

|        | Emissionsmenge | Anzahl Grenzwertüberschreitungen |
|--------|----------------|----------------------------------|
| N      | 0.58           | 0.568                            |
| v      | 0.15           | 0.150                            |
| d      | 0.13           | 0.317                            |
| a_char | 0.75           | 0.697                            |
| r_char | 0.73           | 0.794                            |
| h      | 0.04           | 0.057                            |
| A      | 0.25           | 0.188                            |

## Ergebnis:

- ▶ Sensitivitätsanalyse gleichzeitig für 7 Parameter und 2 Zielgrößen
- ▶ fehlt: Standardabweichung des Modells

Wie kommt man zu dem Versuchsplan?

-> s. ppt

## Zweifachwechselwirkungen bzgl. Emissionsmengen

|        | N | v   | d    | a_char | r_char | h    | A    |
|--------|---|-----|------|--------|--------|------|------|
| N      | 0 | 472 | 345  | 1382   | 1303   | 283  | 904  |
| v      | 0 | 0   | 1508 | 904    | 283    | 1303 | 1382 |
| d      | 0 | 0   | 0    | 283    | 904    | 1382 | 1303 |
| a_char | 0 | 0   | 0    | 0      | 1508   | 345  | 472  |
| r_char | 0 | 0   | 0    | 0      | 0      | 472  | 345  |
| h      | 0 | 0   | 0    | 0      | 0      | 0    | 1508 |
| A      | 0 | 0   | 0    | 0      | 0      | 0    | 0    |

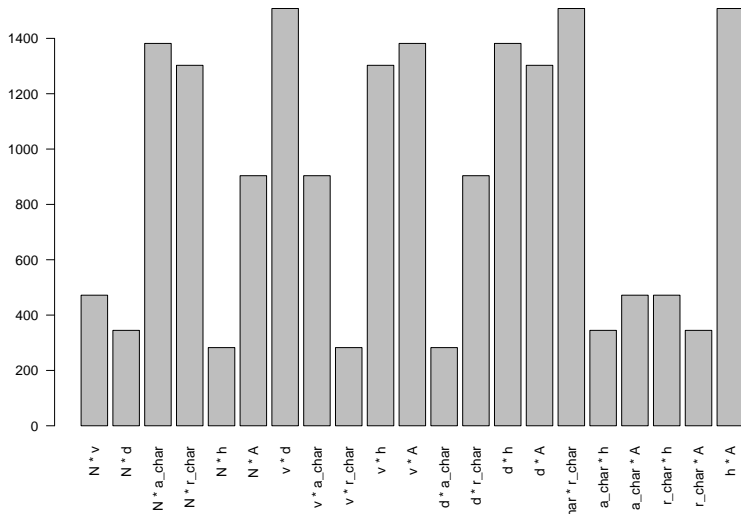


## Wechselwirkungen bzgl. Anzahl Überschreitungen

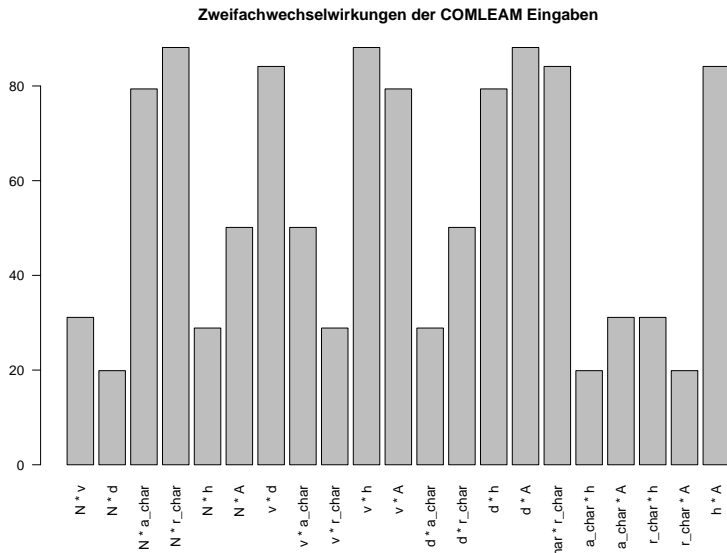
|        | N | v    | d    | a_char | r_char | h    | A    |
|--------|---|------|------|--------|--------|------|------|
| N      | 0 | 31.1 | 19.9 | 79.4   | 88.1   | 28.9 | 50.1 |
| v      | 0 | 0.0  | 84.1 | 50.1   | 28.9   | 88.1 | 79.4 |
| d      | 0 | 0.0  | 0.0  | 28.9   | 50.1   | 79.4 | 88.1 |
| a_char | 0 | 0.0  | 0.0  | 0.0    | 84.1   | 19.9 | 31.1 |
| r_char | 0 | 0.0  | 0.0  | 0.0    | 0.0    | 31.1 | 19.9 |
| h      | 0 | 0.0  | 0.0  | 0.0    | 0.0    | 0.0  | 84.1 |
| A      | 0 | 0.0  | 0.0  | 0.0    | 0.0    | 0.0  | 0.0  |

# WW Effekte bzgl. Emissionsmengen

Zweifachwechselwirkungen der COMLEAM Eingaben



# WW Effekte bzgl. Überschreitungen



# Abschluss

Danke für die Aufmerksamkeit!