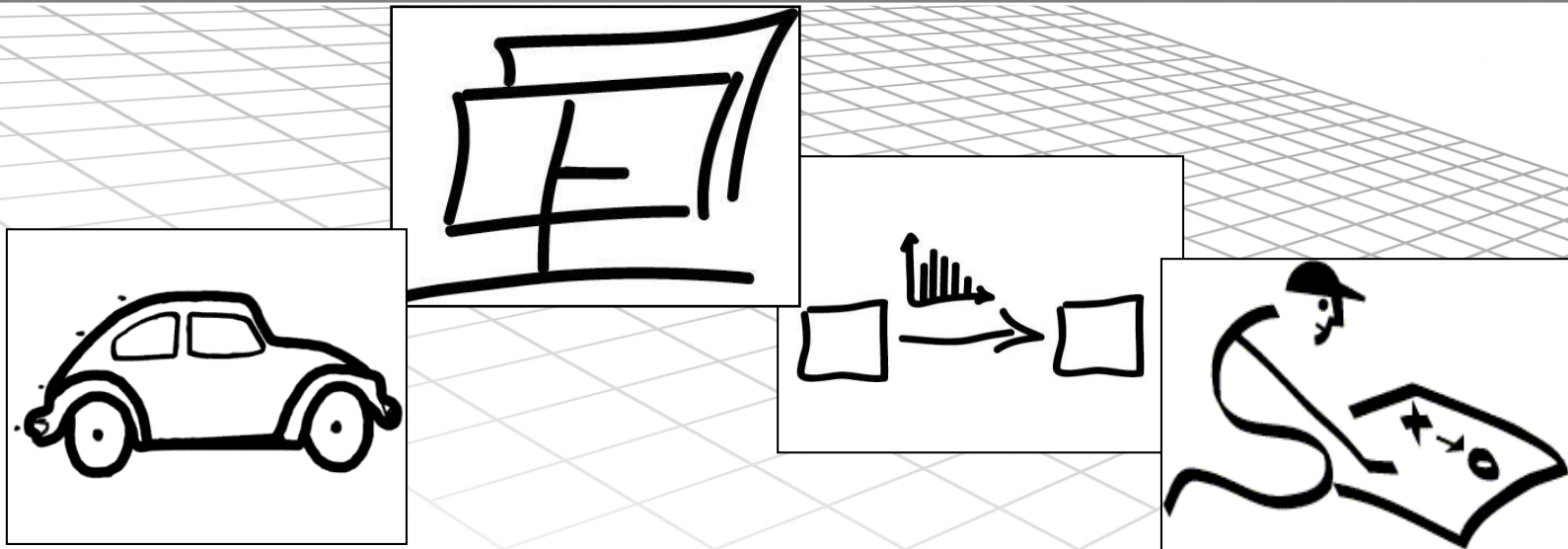


# Versuchsplanung

Vorlesung Modellbildung und Simulation WS 2019 – 2020  
Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans

Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme

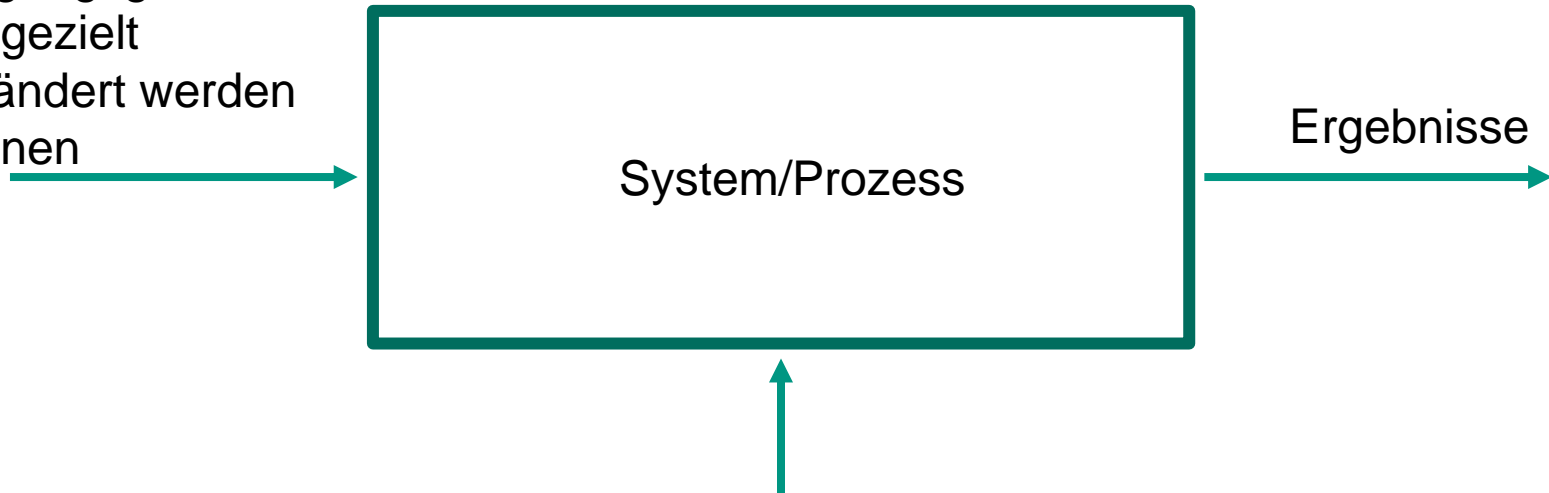


# Experimente

- Breites **Anwendungsspektrum** in Wissenschaft und Technik
  - Charakterisierung/Optimierung von **Prozessen**
    - Verkürzung der Durchlaufzeit in der Fertigung
  - Untersuchung von Materialeigenschaften
    - Kostensenkungen, z.B. geringere Materialkosten
  - Entwurf und Entwicklung von **Produkten**
    - Verkürzung der Entwicklungszeit neuer Produkte
    - Erhöhung des Funktionsumfangs eines Produkts
  - Bestimmung der **Fehler-Toleranz** von Systemen
    - Bessere Erfüllung von Kundenanforderungen
  - und viele weitere

# Ein einfaches Modell

Eingangsgrößen,  
die gezielt  
verändert werden  
können



Unkontrollierbare oder unbekannte Einflussgrößen

# Ein einfaches Modell: Beispiel Kaffeemaschine

Eingangsgrößen:

z.B.

Bohnenqualität,

Temperatur,

Druck



Unkontrollierbare oder unbekannte Einflussgrößen:

z.B. Wasserqualität, Verschmutzung innerhalb der Maschine

# Vorgehensweise

1. Ausgangssituation beschreiben
2. Untersuchungsziel festlegen
3. Zielgrößen und Faktoren festlegen
4. Versuchsplan aufstellen
5. Experimente durchführen
6. Versuchsergebnisse auswerten
7. Ergebnisse interpretieren und Maßnahmen ableiten

# Ausgangssituation beschreiben

- Wer ist der **Kunde**?
- Was ist die langfristige **Zielsetzung**?
- Welches konkrete **Problem** soll durch die jetzt geplante Untersuchung gelöst werden?
- Wie viel **Zeit und Geld** ist verfügbar?
- Was ist über Problemstellung schon **bekannt**?

# Untersuchungsziel festlegen

- Optimierung der Zielgröße(n)
- Erkennung der wichtigsten Einflüsse
- Robuste Faktoreinstellung (Robustheit der Zielgrößen hinsichtlich Schwankungen der Faktoreinstellungen)

# Zielgrößen und Faktoren festlegen

- Für Auswahl der Zielgrößen zu berücksichtigende Aspekte
  - Kundenorientierung/Relevanz
  - Vollständigkeit
  - Verschiedenheit (keine Abhängigkeiten der Zielgrößen voneinander)
- Achtung: Aspekte können im Konflikt stehen!
- **Faktoren** = Teilmenge aus der Menge der Einflussgrößen, die in der Analyse näher untersucht werden sollen
- Festlegung der Faktorwertstufen
  - Art des Faktors (quantitativ/qualitativ)
  - **Richtige Auflösung** bei quantitativen Größen



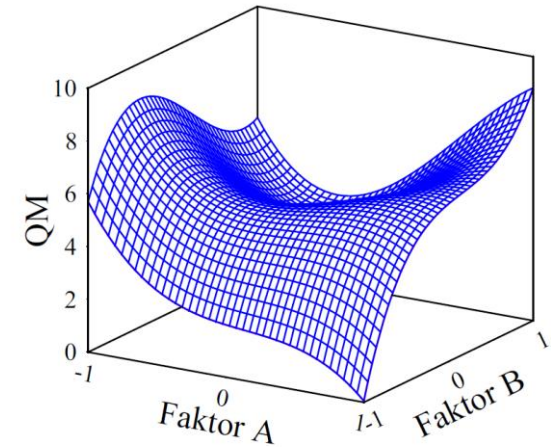
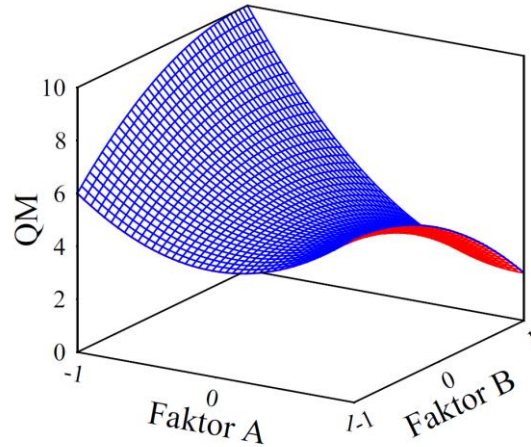
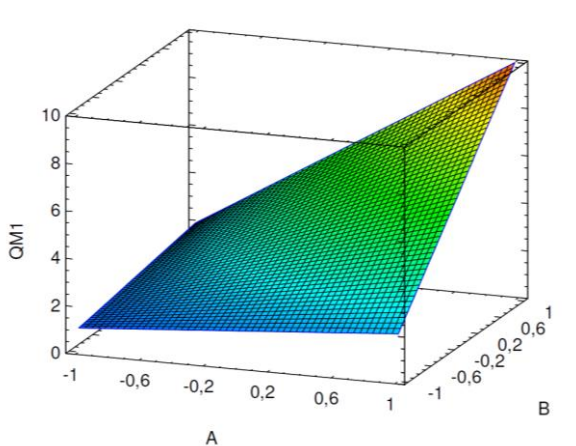
# Versuchsplan Aufstellen

- Festlegung der **Wertstufenkombinationen**
- Anzahl der **Replikationen**
  - Verbesserung der Schätzung von Effekten
  - Schätzung der Reststreuung
- **Aufwandsabschätzung**

# Restliche Schritte

- Experimente **durchführen**
- Versuchsergebnisse **auswerten**
  - Anwendung statistischer Methoden (z.B. Konfidenzintervall - Vertrauensbereich der Ergebnisse)
  - Identifikation/Behandlung von **Ausreißern**
- Ergebnisse **interpretieren** und Maßnahmen ableiten
  - **Bedeutung** der Ergebnisse
  - Einleitung neuer Experiment-**Iterationen**

# Beschreibungsmodelle



## ■ Linear

- Teilfaktorielle zweistufige Versuchspläne

## ■ Komplexe Zusammenhänge

- Monte-Carlo-Verfahren

## ■ Quadratisch

- Central-Composite-Design

## ■ Kubisch

- Space Filling Design

Quelle: Siebertz et. al.: Statistische Versuchsplanung

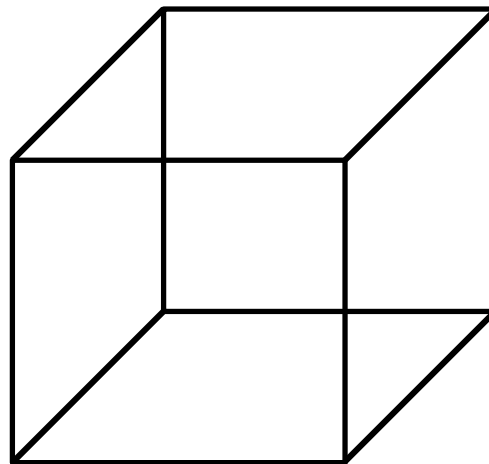
# Vollfaktorieller Versuchsplan – Alle Möglichkeiten probieren

Einflussgröße 1 → 5 Stufen

Einflussgröße 2 → 3 Stufen

Einflussgröße 3 → 4 Stufen

**$5 \times 3 \times 4 = 60$  Versuche**



Versuchsraum

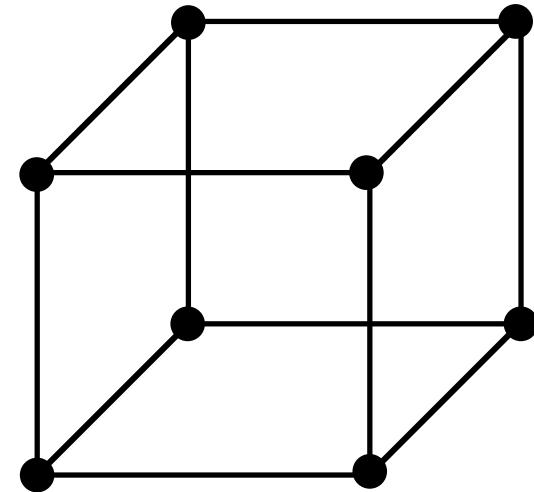
# Zweistufiger teilfaktorieller Versuchsplan – DoE (Design of Experiments)

Einflussgröße 1 → 5 Stufen

Einflussgröße 2 → 3 Stufen

Einflussgröße 3 → 4 Stufen

→ Lediglich Betrachtung der Extremwerte



# Zweistufiger teilfaktorieller Versuchsplan – DoE (Design of Experiments)

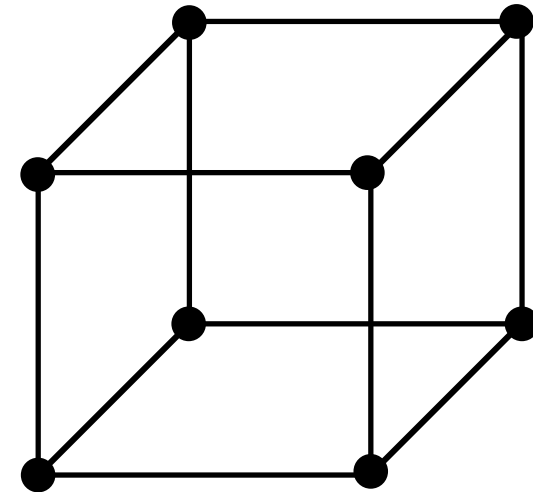
Einflussgröße 1 → 5 Stufen

Einflussgröße 2 → 3 Stufen

Einflussgröße 3 → 4 Stufen

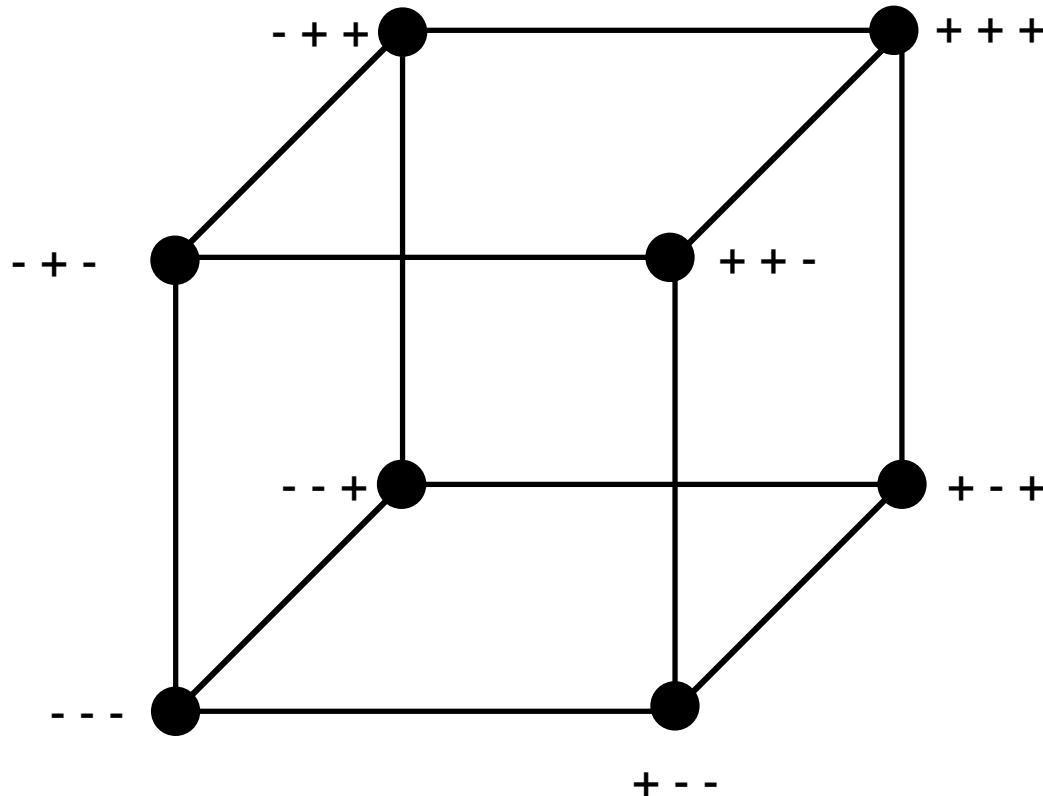
→ Lediglich Betrachtung der Extremwerte

E1	E2	E3		
-	-	-		
-	-	+		
-	+	+		
+	+	+		
+	-	-		
+	-	+		
+	+	-		
-	+	-		



→ 8 Versuche

# Zweistufiger teilfaktorieller Versuchsplan – DoE (Design of Experiments)



# Zweistufiger teilfaktorieller Versuchsplan – DoE (Design of Experiments)

	E 1	E 2	E 3	Ergebnis der Zielgröße
Versuch 1	-	-	-	
Versuch 2	-	-	+	
Versuch 3	-	+	+	
Versuch 4	+	+	+	
Versuch 5	+	-	-	
Versuch 6	+	-	+	
Versuch 7	+	+	-	
Versuch 8	-	+	-	



# Zweistufiger teilfaktorieller Versuchsplan – DoE (Design of Experiments)

E 1	E 2	E 3	Ergebnis	
-	-	-	3,6	
-	-	+	1,3	
-	+	+	4,4	
+	+	+	4,4	
+	-	-	4,2	
+	-	+	2,7	
+	+	-	6,4	
-	+	-	1,7	

# Zweistufiger teilfaktorieller Versuchsplan – DoE (Design of Experiments)

	E 1	E 2	E 3	Ergebnis	
	-	-	-	3,6	
	-	-	+	1,3	
	-	+	+	4,4	
	+	+	+	2,6	
	+	-	-	4,2	
	+	-	+	2,7	
	+	+	-	6,4	
	-	+	-	1,7	
MW+	3,98				

# Zweistufiger teilfaktorieller Versuchsplan – DoE (Design of Experiments)

	E 1	E 2	E 3	Ergebnis	
	-	-	-	3,6	
	-	-	+	1,3	
	-	+	+	4,4	
	+	+	+	2,6	
	+	-	-	4,2	
	+	-	+	2,7	
	+	+	-	6,4	
	-	+	-	1,7	
MW+	3,98				
MW-	2,75				

# Zweistufiger teilfaktorieller Versuchsplan – DoE (Design of Experiments)

	E 1	E 2	E 3	Ergebnis
	-	-	-	3,6
	-	-	+	1,3
	-	+	+	4,4
	+	+	+	2,6
	+	-	-	4,2
	+	-	+	2,7
	+	+	-	6,4
	-	+	-	1,7
MW+	3,98			
MW-	2,75			
Effekt	1,23			

# Zweistufiger teilfaktorieller Versuchsplan – DoE (Design of Experiments)

E 1	E 2	E 3	Ergebnis
-	-	-	3,6
-	-	+	1,3
-	+	+	4,4
+	+	+	2,6
+	-	-	4,2
+	-	+	2,7
+	+	-	6,4
-	+	-	1,7

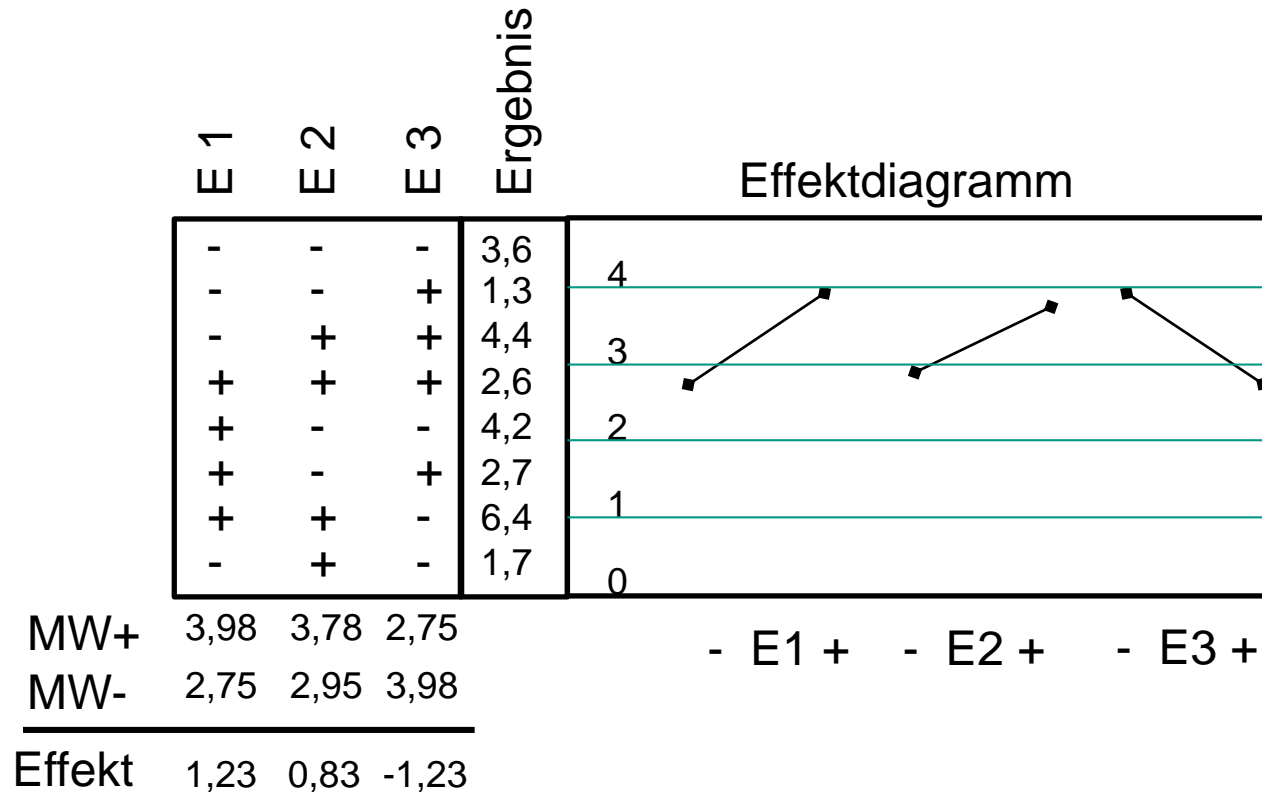
MW+ 3,98 3,78 2,75

MW- 2,75 2,95 3,98

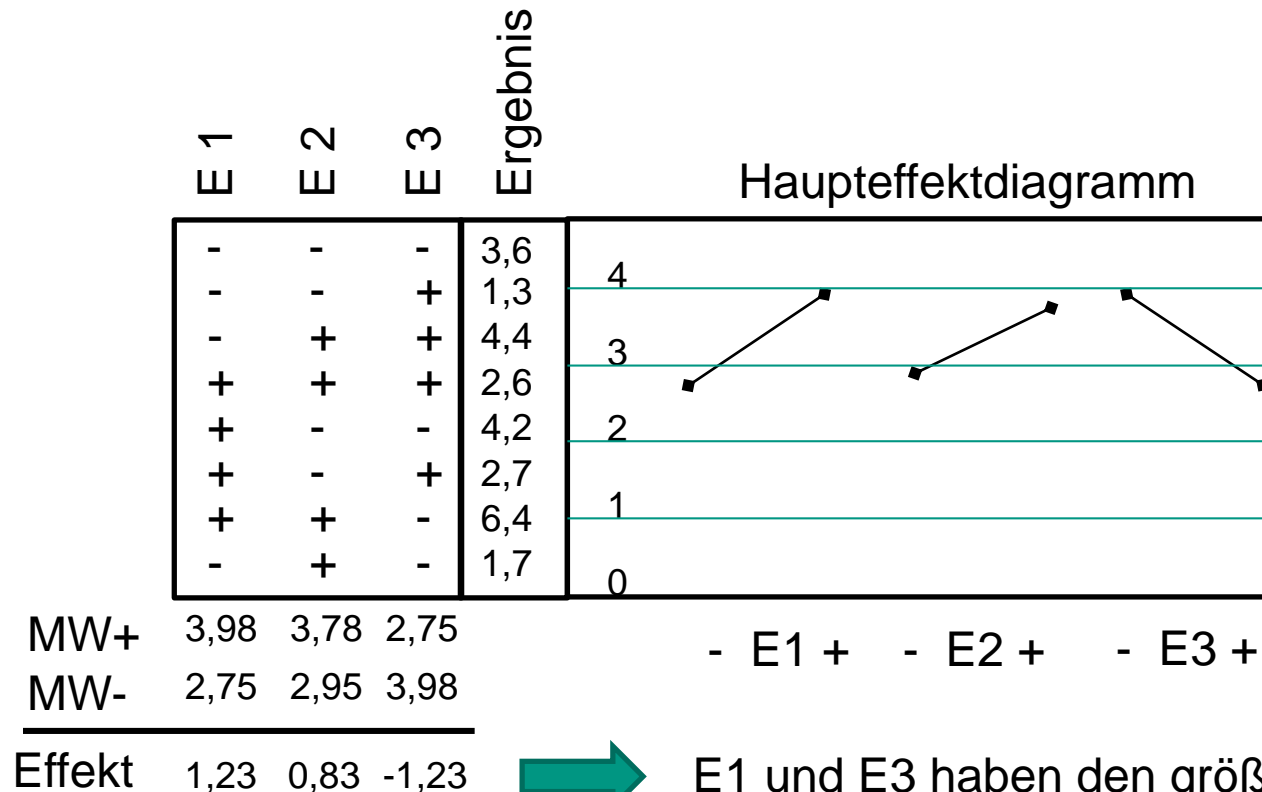
---

Effekt 1,23 0,83 -1,23

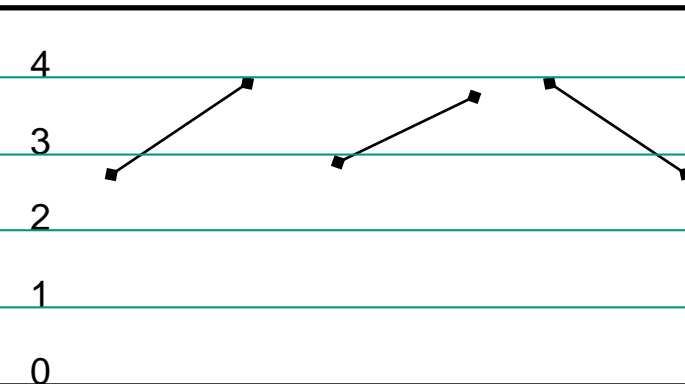
# Zweistufiger teilfaktorieller Versuchsplan – DoE (Design of Experiments)



# Zweistufiger teilfaktorieller Versuchsplan – DoE (Design of Experiments)



Haupteffektdiagramm



E1 und E3 haben den größten Effekt auf die Zielgröße und sollten im nächsten Schritt genauer untersucht werden.

# Zweistufiger teilfaktorieller Versuchsplan – DoE

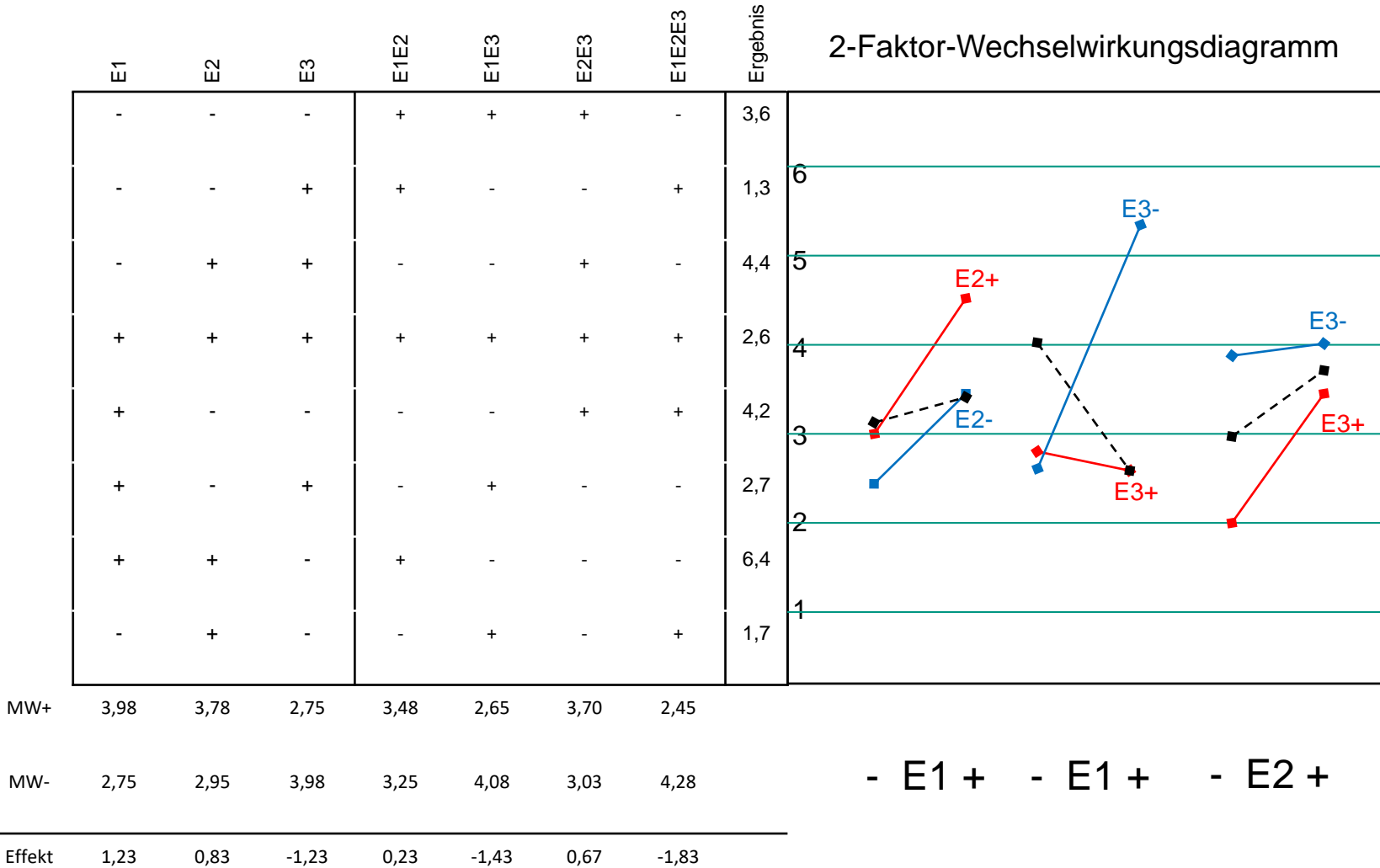
## Wechselwirkungseffekte

	E1	E2	E3	E1E2	E1E3	E2E3	E1E2E3	Ergebnis
	-	-	-	+	+	+	-	3,6
	-	-	+	+	-	-	+	1,3
	-	+	+	-	-	+	-	4,4
	+	+	+	+	+	+	+	2,6
	+	-	-	-	-	+	+	4,2
	+	-	+	-	+	-	-	2,7
	+	+	-	+	-	-	-	6,4
	-	+	-	-	+	-	+	1,7
MW+	3,98	3,78	2,75	3,48	2,65	3,70	2,45	
MW-	2,75	2,95	3,98	3,25	4,08	3,03	4,28	
Effekt	1,23	0,83	-1,23	0,23	-1,43	0,67	-1,83	



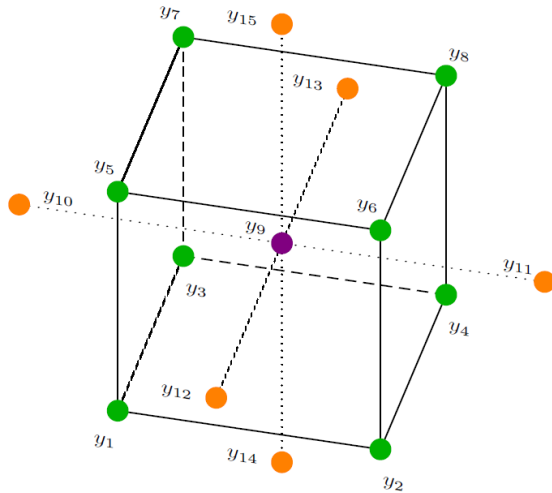
# Zweistufiger teilfaktorieller Versuchsplan – DoE

## Wechselwirkungseffekte

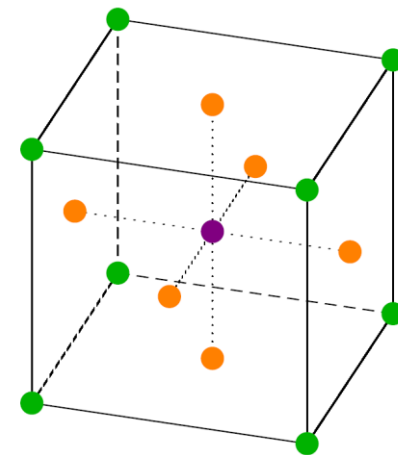


# Central Composite Design

- Zusätzliche Versuche (Stern) aufbauend auf zweistufigem Versuchsplan (Würfel)



Central-Composite-Design

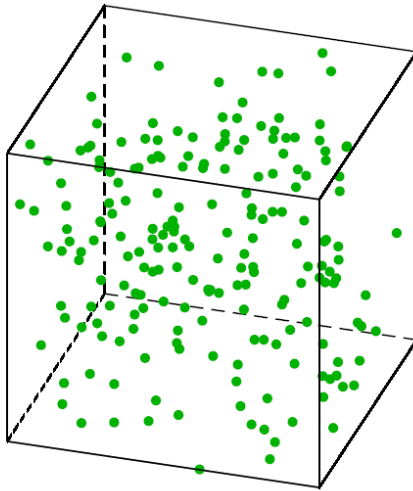


Face-Centered-Central-Composite-Design

Besonders geeignet für quadratische Beschreibungsmodelle

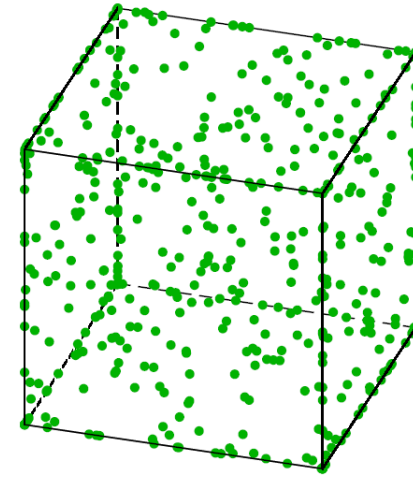
Quelle: Siebertz et. al.: Statistische Versuchsplanung

# Space Filling Design und Monte Carlo



## ■ Monte-Carlo-Verfahren

- Faktoreneinstellung per Zufallsgenerator
- Hohe Anzahl an Kombinationen



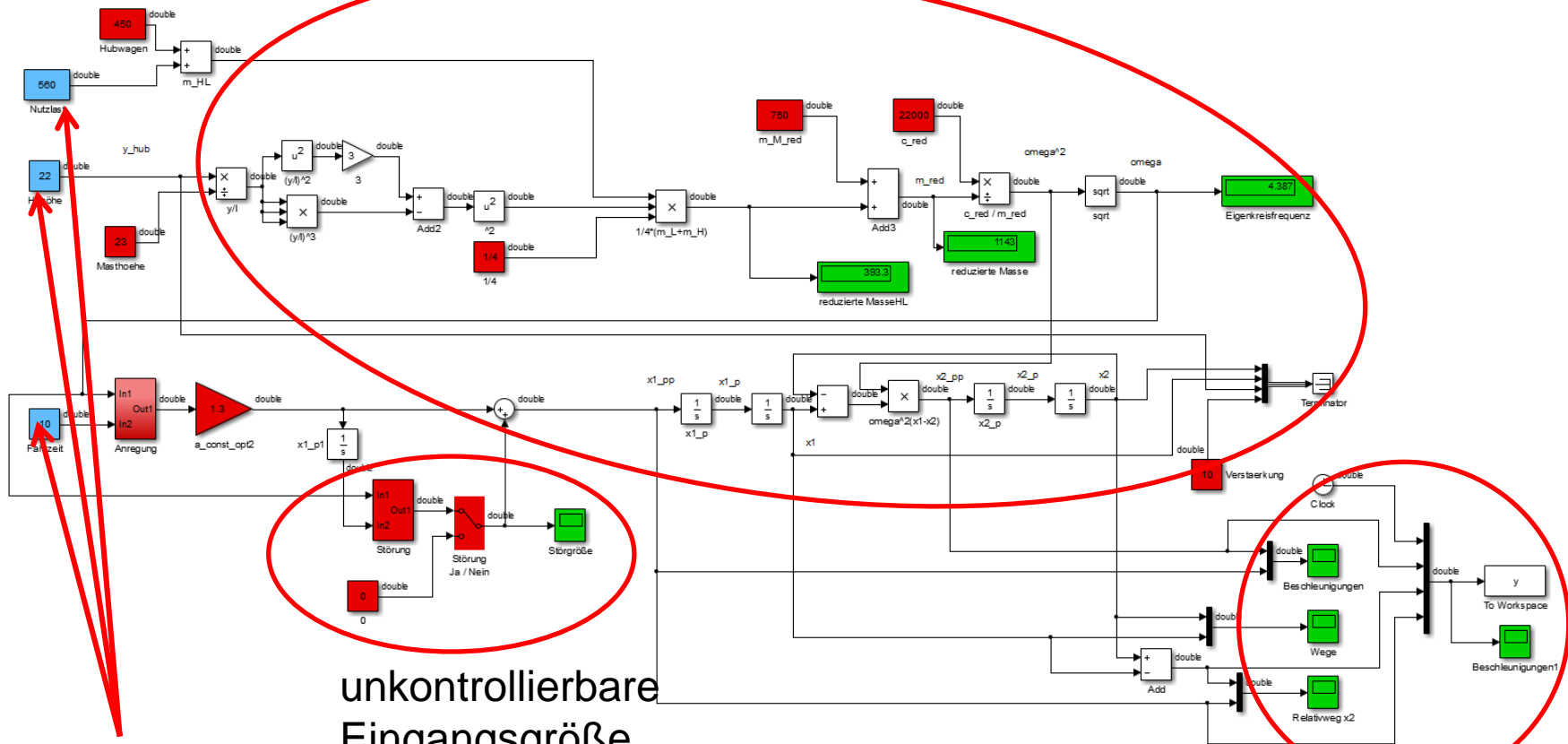
## ■ Space Filling Design

- Faktoreneinstellung per Zufallsgenerator
- Möglichst gleichmäßige Verteilung im Faktorraum

Auch für komplexere Zusammenhänge geeignet

*Quelle: Siebertz et. al.: Statistische Versuchsplanung*

# Regalbediengerät (RBG) – Modell



kontrollierbare  
Eingangsgrößen

unkontrollierbare  
Eingangsgröße  
→ Störung

Ausgangsgrößen

# Modellparameter

## ■ Eingangsgrößen

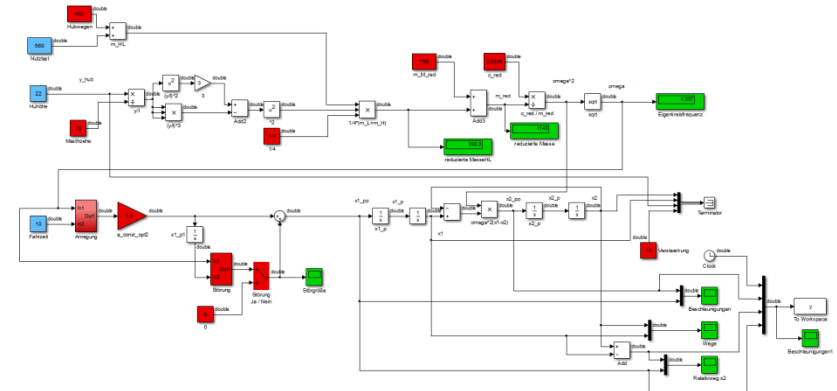
- Last
- Hubhöhe
- Fahrzeit

## ■ Unkontrollierbare Größen

- Störung
  - (Abhängig von Eigenkreisfrequenz und Geschwindigkeit)

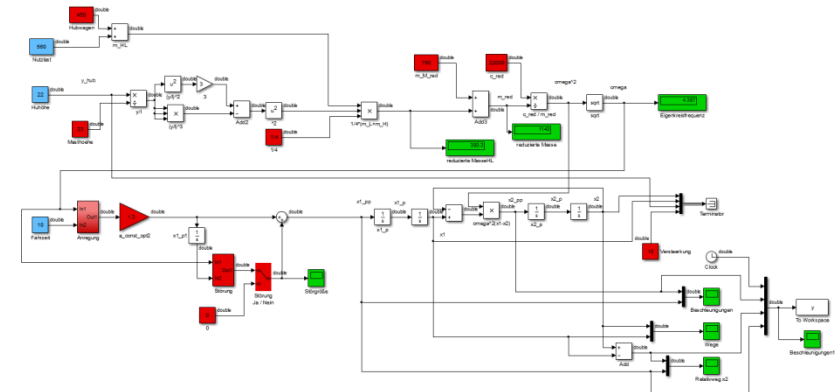
## ■ Ausgangsgrößen

- Beschleunigung  $X_2$  [m/s<sup>2</sup>]
- Auslenkung  $X_2$  [m]



# Modellparameter

## ■ Last



Leerfahrt: 0 kg  
Voll beladen: 560 kg  
Beliebige Abstufung möglich

# Modellparameter

- Hubhöhe
- Fahrzeit

Min: 1 m  
Max: 22 m  
Abstufung: 1,4 m



Min: 2 s  
Max: 30 s  
Abstufung: 2 s

# Modellparameter

## ■ Eingangsgrößen

- Last 0 bis 560 kg → 20 kg/Schritt → 29 Schritte
- Hubhöhe 1 bis 22 m → 1,4 m/Schritt → 16 Schritte
- Fahrzeit 2 bis 30 s → 2 s/Schritt → 15 Schritte

■ →  $29 \times 16 \times 15 = 6960$  Einzelversuche

■ → Versuchsplan um Einflussfaktoren zu identifizieren

■ → 8 Versuche