

Resolution

Beginnen wir also mit einem grundlegenden Begriff: der **Resolution**. Sie beschreibt, wie gut sich Haupteffekte und Wechselwirkungen voneinander trennen lassen. Je höher die Resolution, desto klarer können einzelne Effekte und deren Wechselwirkungen identifiziert werden. Der Haken dabei? Mit zunehmender Resolution steigt auch der Aufwand, da mehr Versuche nötig sind.

Hier eine kurze Übersicht zu den verschiedenen **Resolutionen**:

Resolution	Beschreibung	Anwendungsfall
Resolution III	Haupteffekte sind nicht vollständig von Wechselwirkungen zweiter Ordnung getrennt. Dadurch kann es zu Verwechslungen kommen, bei denen Wechselwirkungen fälschlicherweise als Haupteffekte interpretiert werden oder umgekehrt.	Geeignet für Screening Designs , wenn nur Haupteffekte relevant sind.
Resolution IV	Haupteffekte sind klar von Wechselwirkungen zweiter Ordnung trennbar, jedoch können Wechselwirkungen sich überlagern.	Wird verwendet, wenn Haupteffekte ohne Verwechslungen mit zweifachen Wechselwirkungen analysiert werden sollen.
Resolution V	Haupteffekte und Wechselwirkungen zweiter Ordnung sind vollständig trennbar.	Ideal für detaillierte Untersuchungen, bei denen Wechselwirkungen von Interesse sind.
Resolution VI	Haupteffekte, zweifache und dreifache Wechselwirkungen können getrennt werden.	Geeignet für komplexere Designs, bei denen mehrfache Wechselwirkungen untersucht werden.
Resolution VII	Alle Effekte, einschließlich vierfacher Wechselwirkungen, sind voneinander trennbar.	Empfohlen für sehr komplexe Prozesse mit einer Vielzahl von Wechselwirkungen.

Tabelle 1: Resolution in der Versuchsplanung

Nun zu einem entscheidenden Punkt: Als DoE-Versuchsplaner streben wir natürlich immer nach Effizienz (oder, seien wir ehrlich – manchmal sind wir einfach faul oder unter Zeitdruck). Unser Ziel ist es, mit möglichst wenigen Versuchen das Maximum an Erkenntnissen herauszuholen. Warum also mehr Versuche durchführen, als wirklich notwendig sind? Aus dieser Überlegung ergeben sich einige wichtige Punkte, die wir im Hinterkopf behalten sollten:

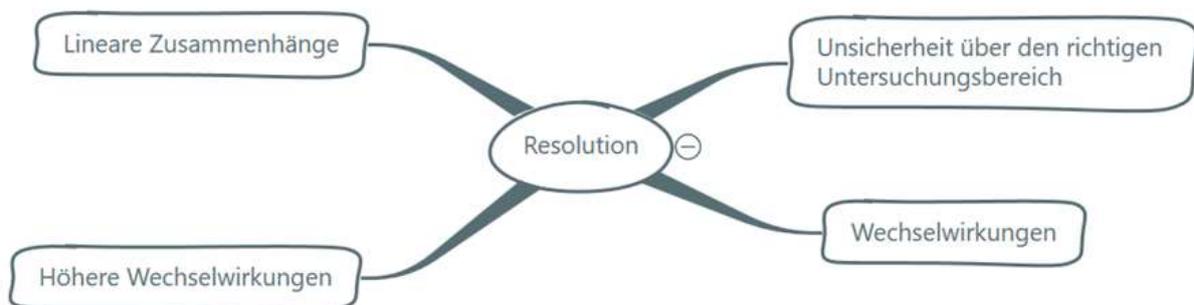


Abbildung 2: Einfluss auf die Wahl der angemesseneren Resolution

Einfluss auf die Wahl der angemesseneren Resolution

- **Lineare Faktoren:** Wenn Ihr Prozess sich zufriedenstellend durch die richtigen Faktoren linear beschreiben lässt, können Sie sich beruhigt zurücklehnen – eine höhere Auflösung als **Resolution IV** brauchen Sie nicht. Warum? Weil die Haupteffekte bereits klar erkennbar sind und zusätzliche Komplexität hier nur unnötige Arbeit ohne Wissenszugewinn verursacht.
- **Unsicherheit über den richtigen Bereich:** Wenn Sie unsicher sind, ob Sie die richtigen Faktoren im passenden Bereich untersuchen, dann sind Designs mit einer niedrigeren Auflösung, wie **Resolution III**, Ihre Wahl. Hier können Sie schnell und mit wenig Aufwand die ersten Erkenntnisse sammeln, bevor Sie in die Details gehen.
- **Wechselwirkungen im Fokus:** Sobald Sie die relevanten Faktoren sicher im Blick haben und die Wechselwirkungen in den Vordergrund rücken, ist ein Design der **Resolution V** die ideale Wahl. Hier werden Haupteffekte und zweifache Wechselwirkungen sauber voneinander getrennt, sodass Sie sich auf das Wesentliche konzentrieren können.
- **Höhere Wechselwirkungen:** Aus Erfahrung wissen wir: Dreifache und noch höhere Wechselwirkungen sind in den meisten Fällen selten von Bedeutung. Sie werden oft von Störeinflüssen überlagert, die außerhalb unserer Kontrolle liegen. Also, warum sich unnötig stressen? Designs, die solche Effekte berücksichtigen, führen meistens nur zu einem unnötigen Mehraufwand.

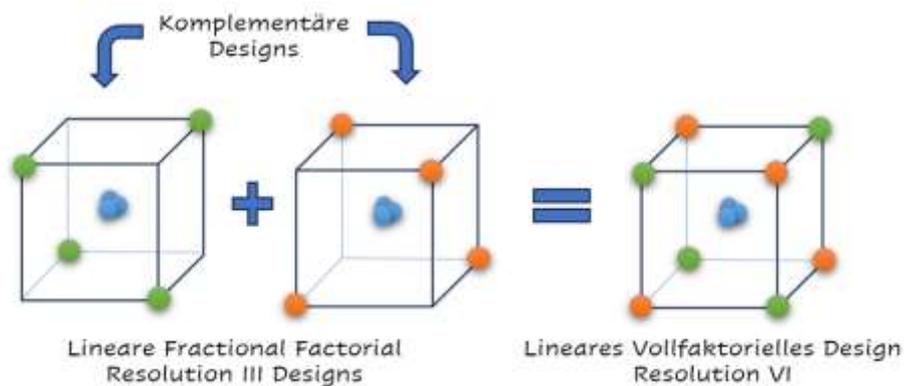


Abbildung 3: Komplementäres Design

Im voranstehenden schematischen Bild sehen wir links zwei komplementäre Designs mit **Resolution III**. Für die Versuchsplanung ist es unerheblich, mit welchem dieser beiden Designs begonnen wird, um die Effekte der linearen Terme zu berechnen. Wichtig ist lediglich, durch eines der Designs sicherzustellen, dass Sie die richtigen Faktoren im richtigen Bereich unabhängig voneinander untersuchen.

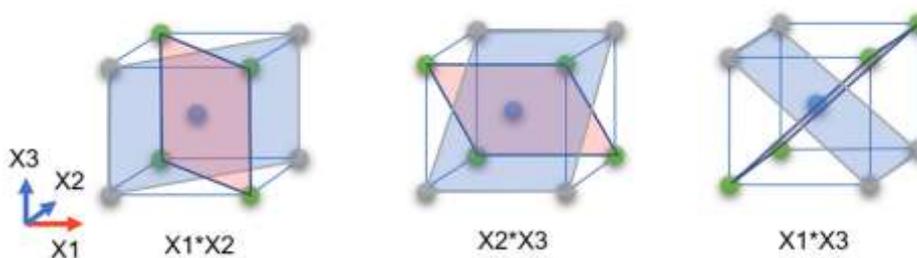


Abbildung 4: Wechselwirkungen Berücksichtigung im Design

Wechselwirkungen

Sollten Sie während Ihrer Analyse feststellen, dass es aufgrund Ihrer fachlichen Einschätzung noch Wechselwirkungen gibt, die wahrscheinlich auftreten, dann keine Panik: Sie können einfach den fehlenden Teil der Versuche – den sogenannten komplementären Teil – nachholen. Auf diese Weise lassen sich die Wechselwirkungen unabhängig voneinander berechnen. Wie im Schaubild ersichtlich, sind die nötigen Versuche für die Untersuchung der Wechselwirkungen über die diagonalen, sich überschneidenden Flächen verteilt. Diese wichtigen Informationen werden durch die Kombination der beiden komplementären Versuchssets erfasst.

Betrachtet man jedoch nur eines der beiden Sets, fehlen diese entscheidenden Datenpunkte, was die Analyse ungenauer macht. Hier wird es besonders bei vielen Faktoren und wenigen Versuchen richtig knifflig. Die optimale Anzahl an Experimenten zu bestimmen, um alle relevanten Effekte präzise zu erfassen, wird zu einer immer schwierigeren Aufgabe. Je weniger Versuche Sie durchführen, desto stärker versuchen Sie, die Schwankungen in den Ergebnissen mit den vorhandenen Modelltermen zu erklären – was oft zu unsauberer Interpretationen führt.

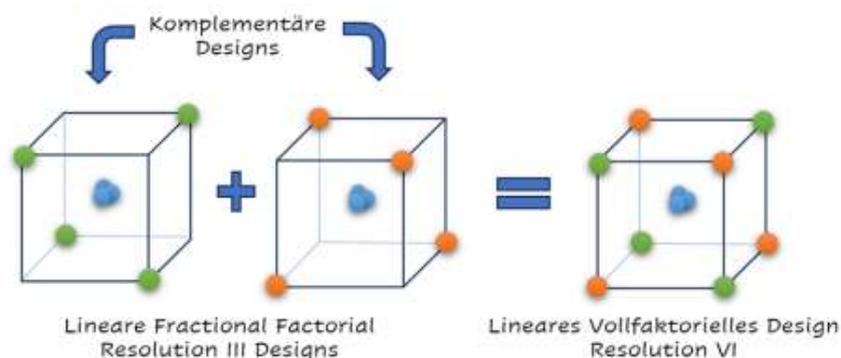
Mit der Nachholung des komplementären Teils können Sie sicherstellen, dass versteckte Wechselwirkungen korrekt erfasst werden. Sie sollten diese Versuche jedoch nur durchführen, wenn Ihre Software oder Analyse darauf hinweist, dass dies wirklich notwendig ist. Denn niemand möchte unnötige Experimente machen, die keinen Mehrwert bringen. Hier hilft der gezielte Einsatz von Analyse-Tools, um effizient zu bleiben!

Term	Generator	Confounded with
x1	a	x2*x3
x2	b	x1*x3
x3	ab	x1*x2
x1*x2		x3
x1*x3		x2
x2*x3		x1

Hier steht die Anzahl der Freiheitsgrade und die Untersuchung vieler Terme und Wechselwirkungen bei wenigen Versuchen im Widerspruch. Das bedeutet, dass aufgrund der niedrigen Resolution einige Effekte nicht klar den Haupteffekten oder Wechselwirkungen zugeordnet werden können. Dies führt zu sogenannten Confoundings, bei denen Effekte vermischt werden, was die Interpretation der Ergebnisse erschwert und die Qualität des Modells beeinträchtigen kann.

Tabelle 2: Vermischungen oder Confoundings

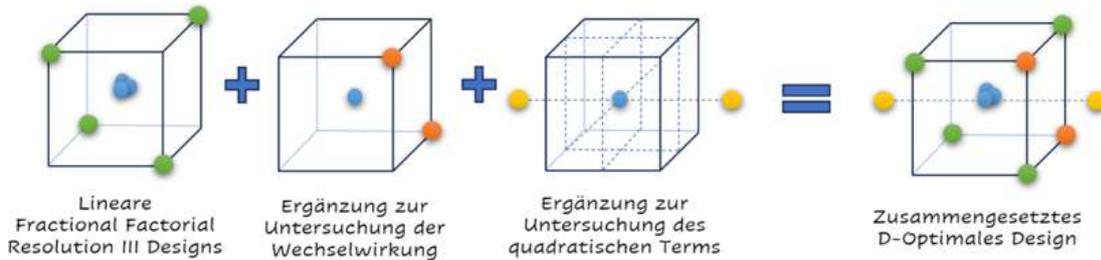
In der voranstehenden Tabelle können Sie sehen, welche linearen Terme mit welchen Wechselwirkungen verschränkt sind und daher nicht unabhängig voneinander berechnet werden können.



Wenn es jedoch Hinweise darauf gibt, dass diese Wechselwirkungen einen signifikanten Einfluss haben, empfiehlt es sich, ein sogenanntes „Fold-Over“ durchzuführen. Dabei ergänzt man die ursprüngliche Versuchsplanung um die zuvor ausgelassenen Experimente, um die Wechselwirkungen korrekt und unabhängig berechnen zu können.

Warum nicht von Anfang an alles vollumfänglich untersuchen?

Man könnte jetzt einwenden, dass man dies von Anfang an hätte machen können. Ja, das wäre möglich – vorausgesetzt, Ihre Experimente sind schnell durchführbar, einfach messbar und kostengünstig. In solchen Fällen spricht nichts dagegen. Aber wenn Ihre Experimente teuer, zeitaufwendig oder schwer messbar sind (weil Sie vielleicht noch an einer geeigneten Messmethode arbeiten), dann wäre es besser, zunächst mit einem Screening-Design zu beginnen. So stellen Sie sicher, dass Sie die richtigen Faktoren im richtigen Bereich untersuchen. Andernfalls laufen Sie Gefahr, viel Aufwand zu betreiben, ohne die gewünschten Ergebnisse zu erzielen.



Die Situation wird noch komplexer, wenn Ihre Experimente sehr teuer und aufwendig sind und Sie auf Basis Ihrer Expertise sowie der Hinweise aus der DoE-Studie und der Versuchsplanungssoftware nur gezielt bestimmte Experimente nachholen möchten. Beispielsweise könnte es darum gehen, eine spezifische Wechselwirkung oder einen zusätzlichen quadratischen Term genauer zu untersuchen. In solchen Fällen ist es oft schwieriger, die Designqualität richtig einzuschätzen.

Hier kann ein softwaregestütztes **D-optimales Design** Abhilfe schaffen. Mit diesem Ansatz wird der Versuchsraum gezielt und asymmetrisch durch die notwendigen Experimente ergänzt, ohne dass alle Eckpunkte des Designs getestet werden müssen, die vielleicht gar nicht relevant sind. **D-optimale Designs** maximieren die Menge an Informationen, die aus einer festgelegten Anzahl von Versuchen gewonnen werden kann, und reduzieren gleichzeitig unnötige Experimente.

In der schematischen Darstellung oben wird das deutlich: Anstatt jeden Rand- und Eckpunkt des Versuchsraums zu untersuchen, fokussieren sich die Experimente auf Bereiche, die die meisten Informationen liefern. Dies spart nicht nur Kosten und Zeit, sondern steigert auch die Effizienz, da weniger Versuche benötigt werden, um Wechselwirkungen und quadratische Terme präzise zu modellieren.

Hinweis: Ich empfehle, bei diesen nachträglichen Versuchen zusätzliche **Centerpoints** einzufügen. Diese dienen als Kontrollpunkte, um sicherzustellen, dass sich während der Zeitspanne zwischen den Experimenten keine systematischen Veränderungen eingeschlichen haben, die sich durch abweichende Ergebnisse in den Centerpoints zeigen könnten.

Doch wie können Sie nun die Qualität Ihres Designs bewerten?

Genau hier kommen die Bewertungstools Ihrer Versuchsplanungssoftware ins Spiel. Werkzeuge wie **Condition Number, G-Efficiency, Determinante und Power** bieten Ihnen die Möglichkeit, die Qualität des Designs objektiv zu bewerten.

Nach dem wir im vorgegangenen [Blog #35](#) auf einige der Begriffe eingegangen waren möchte ich nach einer sehr kurzen Zusammenfassung der anderen Bewertungstools nun die G-efficiency eingehen.

- **Condition Number:** Diese Zahl gibt an, wie stabil und robust Ihr Modell ist. Ein hoher Wert weist auf potenzielle Probleme mit Multikollinearität hin, was bedeutet, dass bestimmte Faktoren oder Wechselwirkungen zu stark miteinander korrelieren. Ein niedriger Wert signalisiert ein gut konditioniertes Design.

- **Determinante:** Die Determinante der Informationsmatrix gibt an, wie gut Ihr Design die Modellparameter schätzen kann. Ein höherer Wert bedeutet, dass Ihr Design eine größere statistische Power hat und somit präzisere Schätzungen der Effekte ermöglicht.
- **Power:** Die statistische Power gibt an, wie gut das Design in der Lage ist, tatsächlich vorhandene Effekte zu entdecken. Ein Design mit hoher Power erkennt auch kleine, aber signifikante Effekte zuverlässig.

G-Effizienz: Gleichmäßige Verteilung der Varianz

Die **G-Effizienz** misst, wie gleichmäßig die Varianz der Vorhersagen im gesamten Designraum verteilt ist. Ein Design mit hoher G-Effizienz sorgt dafür, dass die Vorhersagen stabil und zuverlässig sind – **nachdem die Experimente durchgeführt wurden**. Dies ist besonders relevant bei **D-optimalen Designs**, wenn bestimmte Versuchspunkte aufgrund von Kosten oder Durchführbarkeit nicht untersucht werden können.

G-Effizienz kann als Annäherung an ein geometrisch balanciertes Design betrachtet werden. Sie zielt darauf ab, die Vorhersagegenauigkeit im Designraum gleichmäßig zu verteilen. In der Praxis ist es jedoch oft nicht möglich, jeden Punkt im Versuchsraum zu testen. Hier hilft die G-Effizienz, indem sie sicherstellt, dass auch bei Einschränkungen des Versuchsraums die Verteilung der Vorhersagevarianz optimal bleibt.

Mit anderen Worten: Ein Design mit hoher G-Effizienz minimiert die „Lücken“ im Versuchsraum und sorgt dafür, dass die Vorhersagen robuster sind, selbst wenn der Versuchsraum nicht vollständig abgedeckt wird. Das ist besonders nützlich, wenn nicht alle Punkte zugänglich oder messbar sind.

Beispiel: Wenn eine Ecke des Designraums nicht untersucht werden kann, sorgt die G-Effizienz dafür, dass der Rest des Designs dennoch stabile Vorhersagen ermöglicht, indem die Varianz geschickt verteilt wird.

Die Berechnung der G-Effizienz erfolgt üblicherweise durch Ihre Software. Zur Vollständigkeit hier die Formel:

$$G - \text{Effizienz} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{v(x_i)} \right)^{-1}$$

wobei:

- $v(x_i)$ die Vorhersagevarianz für jeden Punkt x_i im Designraum ist
 - und n die Anzahl der Versuche

Ich hoffe, ich konnte Ihnen mit diesem Blog und dem Exkurs über „Resolution“ und „Confoundings“ die Bedeutung von Design-Kennzahlen, insbesondere der G-Efficiency, näherbringen. In der DoE zählt nie der einzelne Versuch, sondern immer die Gruppe von Versuchen, die zusammen eine Modellierung ermöglichen. Ein gut durchdachtes Design ist der Schlüssel, um mit Ihrem Modell die Realität möglichst effizient und zielführend zu beschreiben. Auch wenn ich den Bogen von fraktionellen Faktoriellen Designs über Fold-Over bis hin zu D-optimalen Designs gespannt habe, zeigt dies, wie vielfältig und mächtig DoE-Methoden sein können. Letztlich geht es immer darum, das Maximum an Informationen aus einer strukturierten Gruppe von Versuchen herauszuholen, um verlässliche Ergebnisse zu erzielen.

Bleiben Sie experimentierfreudig und neugierig!



🗨️ Bleiben Sie am Ball! In den kommenden #DoE-Happen vertiefen wir diese und andere Fragestellungen. Bitte teilen Sie Ihre Erfahrungen z.B. bei LinkedIn in den #Kommentaren. Sie können Sie die Themenrichtung mitgestalten. Ich freue mich darauf, von Ihnen zu hören!

📖 Für regelmäßige Updates besuchen Sie meine Webseite: www.stefan-moser.com, wo Sie eine Übersicht und die Chronologie der Blog-Reihe finden.

Ihr DFSS & DoE Trainer,

Stefan Moser

DFSS-Proj.-mgmt. Trainer, DoE & MVDA Lecturer, Trainer, Facilitator, Specialist SIMCA, MODDE, Impulse-Geber

Mein Angebot zur Begleitung und Weiterentwicklung:

Ich biete DoE-Kurse an, die vom Einsteiger- bis zum Masterkurs reichen. Dabei decke ich alle relevanten Bereiche ab: von Fokus-Kursen zu Themen wie Screening, Charakterisierung, Optimierung und Robustheit bis hin zu Spezialkursen zu Mischungs- und Formulierungsdesigns, Stabilität oder spezifischen hierarchischen Designs wie Red Mup.

Neben diesen Kursen unterstütze ich meine Kunden bei der Versuchsplanung – sei es durch gezielte Beratung oder in Form von Troubleshooting oder Workshops. Ich begleite Sie in allen Phasen: von der Problemformulierung und Machbarkeitsstudie über die Optimierung bis zur robusten Absicherung Ihrer Prozesse.

Neben meinem Lieblingsthema DoE biete ich auch Kurse in den Bereichen MVDA, DFSS und QFD an. Hier unterstütze ich unter anderem die Ausbildung zum DFSS-Manager in den Stufen Yellow, Green und Black Belt. Diese Kurse realisiere ich in Zusammenarbeit mit meinen Partnern.

Wenn Sie Ihre Prozesse und Methoden auf das nächste Level bringen möchten, finden wir gemeinsam die passende Lösung!



Wenn Sie dazu mehr erfahren möchten, So finden Sie diese Hinweise auf meiner Webseite. www-stefan-moser.com

Gerne können Sie mich auch direkt anschreiben unter info@stefan-moser.com