

# Nicht mehr raten, sondern wissen: Methoden der Versuchsplanung in einer Produktionsumgebung einsetzen



**Online-Schulungen zum Thema Design of Experiments:**

14. - 15.10.2021 – Faktorielle Versuchspläne in Minitab

18. - 19.10.2021 – Wirkungsflächenversuchspläne mit Minitab

21. - 22.10.2021 – Statistische Versuchsplanung in der Praxis mit Minitab

## Nicht mehr raten, sondern wissen: Methoden der Versuchsplanung in einer Produktionsumgebung einsetzen

Selbst für äußerst erfahrene und kompetente Ingenieure in der Produktionsindustrie sind einige Prozesse so komplex, dass sie nicht zwangsläufig wissen, wie sie die besten Einstellungen für eine Produktionsanlage ermitteln können.

In dieser Situation könnten sie einfach auf der Grundlage einer vagen Vorstellung raten, was in Bezug auf die optimalen Einstellungen zu geschehen hätte, aber dies ist weder ausreichend noch ratsam. Produktionsingenieure benötigen sehr genaue Angaben der korrekten Prozessparameter, bei denen die Eigenheiten der Produktionsanlage berücksichtigt werden.

Oder sie könnten die besten Einstellungen schätzen, die Ergebnisse auswerten und dann versuchen, die Einstellungen zu verbessern, indem sie jeweils einen Faktor ändern. Dies könnte jedoch ein zeitaufwändiger Prozess sein, bei dem möglicherweise trotzdem keine optimalen Einstellungen gefunden werden.

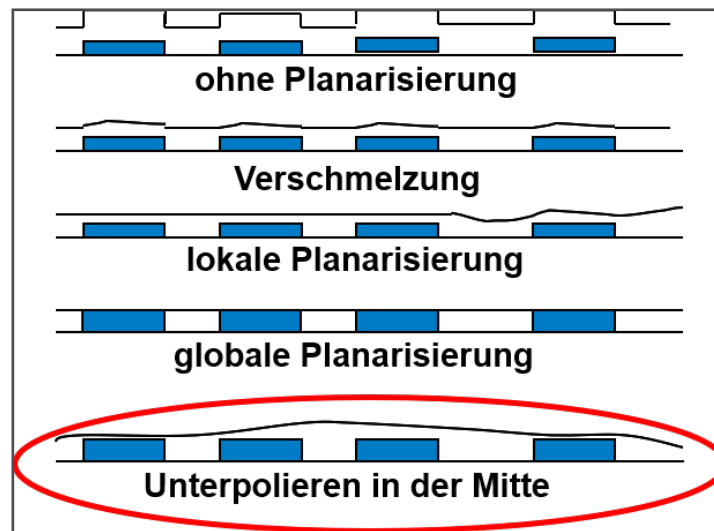
Auch wenn in einer Produktionsumgebung bereits die optimalen Einstellungen für die aktuell vorherrschenden Bedingungen zum Einsatz kommen, müssen früher oder später neue Technologien eingeführt werden, um zukunftsfähig zu bleiben. Dies bringt unbekannte Situationen und neue Probleme mit sich. Schlussendlich brauchen die Ingenieure ein umfassendes Modell, mit dem sie sehr genau verstehen, wie das System funktioniert. Solch ein Modell lässt sich ganz offensichtlich nicht durch Anpassen jeweils einzelner Faktoren oder planloses Experimentieren erzielen.

Die Ingenieure benötigen ein Werkzeug, mit dem sie praktisch, kostengünstig und flexibel Modelle erstellen können. Nur so können sie sich sicher sein, dass die richtigen Prozesseinstellungen beim Produktionsstart eines neuen Produkts rasch ermittelt werden können. Hierfür ist die Versuchsplanung (DOE) ideal geeignet.

## Den richtigen Versuchsplan auswählen

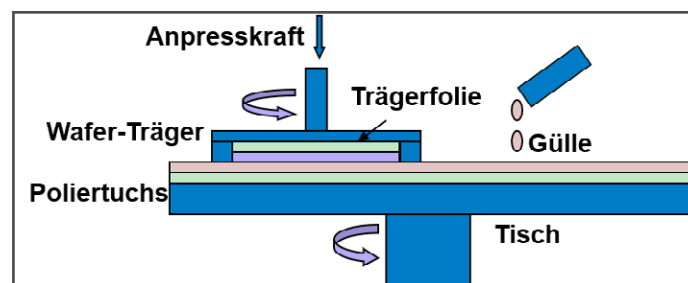
Ein Beispiel für äußerst komplexe und kritische Produktionsprozesse sind die Polierprozesse in der Halbleiterindustrie. Das Ziel sind Wafer, die so eben wie möglich sind, um eine hohe Ausbeute zu erzielen. Eine hohe Erstaubeute ist wesentlich, um sicherzustellen, dass ein Werk wirtschaftlich betrieben wird und der Kunde zufrieden mit der Produktqualität ist.

Ich habe an einem DOE-Projekt bei der Polierphase in einer Anlage für Mikroelektronik mitgewirkt. Beschichtungsrückstände nach dem Polieren des Wafers (unzureichendes Polieren in der Mitte) hatten zu einer unbefriedigenden Ausbeute und Gleichmäßigkeit bei einem bestimmten Material geführt. Die Gleichmäßigkeit musste verbessert werden, da das unzureichende Polieren/Planarisieren die nachfolgenden Produktionsschritte beeinträchtigte.



Es wurden sechs Prozessparameter in Erwägung gezogen. Diese Parameter sind den für Polierprozesse zuständigen Ingenieuren vertraut und einfach anzupassen (Anpresskraft, Rückziehkraft, Trägergeschwindigkeit und Tischgeschwindigkeit). Weitere Parameter (Typ des Poliertuchs, Oszillationen) waren eher als innovativ einzustufen, bedeuteten jedoch nicht zwangsläufig eine bedeutsame Erhöhung der Prozesskosten.

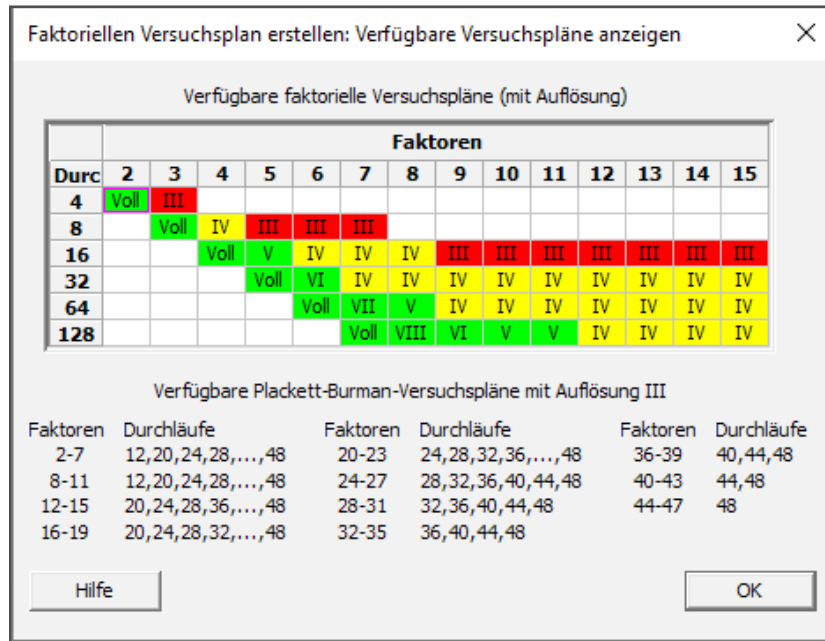
Das Hauptziel war eine höhere Gleichmäßigkeit. Es war jedoch auch wichtig, ein hohes Produktivitätsniveau beizubehalten.



Unser erster Schritt bestand darin, die zu testenden Parametereinstellungen zu ermitteln. Um realistisch zu bleiben, durften sie nicht zu weit auseinander liegen. Doch um einfach feststellen zu können, ob ein Parameter tatsächlich eine Auswirkung hatte, durften sie auch nicht zu nahe beieinander liegen. Wir wählten zwei Stufen für jeden Parameter aus und hatten somit eine zweistufige DOE. Dadurch konnten wir die Anzahl der durchzuführenden Tests reduzieren und wir nahmen an, dass die Effekte innerhalb der Stufen wahrscheinlich größtenteils linear sein würden.

Als Nächstes mussten wir uns um den Versuchsplan und die Anzahl der durchzuführenden Tests kümmern. Dies ist äußerst wichtig, da die zum Ausführen des Experiments verfügbare Zeit häufig äußerst begrenzt ist. Darüber hinaus wollten wir die Anzahl der während der Tests gefertigten Teile minimieren, weil diese Teile nicht an Kunden verkauft werden können.

Die nachfolgende Tabelle ist bei der Wahl des Versuchsplans äußerst hilfreich. Sie befindet sich im Menü für faktorielle Versuchspläne in Minitab (**Gehe zu > Statistik > Versuchsplanung (DOE) > Faktorielle Versuchspläne > Faktoriellen Versuchsplan erstellen >**. In dem geöffneten Dialogfeld wählen wir die Option **Verfügbare Versuchspläne anzeigen**.)



	Faktoren														
Durchläufe	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
4	Voll	III													
8		Voll	IV	III	III	III									
16			Voll	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III	
32				Voll	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	
64					Voll	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	
128						Voll	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV	

Verfügbare Plackett-Burman-Versuchspläne mit Auflösung III					
Faktoren	Durchläufe	Faktoren	Durchläufe	Faktoren	Durchläufe
2-7	12,20,24,28,...,48	20-23	24,28,32,36,...,48	36-39	40,44,48
8-11	12,20,24,28,...,48	24-27	28,32,36,40,44,48	40-43	44,48
12-15	20,24,28,36,...,48	28-31	32,36,40,44,48	44-47	48
16-19	20,24,28,32,...,48	32-35	36,40,44,48		

Bei sechs Parametern hätten wir einen vollständigen Versuchsplan mit 64 Durchläufen (26) aus der Tabelle wählen können, aber dies wäre zu kostenaufwändig. Wir hätten einen Versuchsplan mit 1/2-Fraktion (26-1) wählen können, aber 32 Durchläufe sind immer noch zu kostenaufwändig. Stattdessen wählten wir einen Versuchsplan mit 1/4-Fraktion und 16 Durchläufen (26-2).

Der grüne Bereich in der Tabelle oben ist die sicherste, aber kostenaufwändigste Wahl. Unser Versuchsplan mit 16 Durchläufen ist der beste Kompromiss hinsichtlich Kosten und Risiko.

Der Versuchsplan mit 8 Durchläufen (26-3) wäre noch kostengünstiger, doch weist die rote Einfärbung auf ein höheres Risiko hin: Bei nur 8 Durchläufen sind einige der Hauptfaktoreffekte mit Zwei-Faktor-Wechselwirkungen vermischt, was die Analyse schwerer und riskanter macht. Der Versuchsplan mit 16 Durchläufen ist sicherer (wie durch die gelbe Einfärbung angedeutet), und da die Haupteffekte nicht mit anderen

Haupteffekten vermengt sind, können wir ihren Effekt gefahrlos schätzen.

In diesem Versuchsplan sind die Effekte von Zwei-Faktor-Wechselwirkungen gelegentlich mit anderen Zwei-Faktor-Wechselwirkungen vermengt. Doch wenn ein solcher Wechselwirkungseffekt signifikant ist, würden wir erwarten, dass die Wechselwirkungen, die statistisch signifikante Hauptfaktoren umfassen, wahrscheinlicher signifikant sind als die anderen vermengten Wechselwirkungen, die keine statistisch signifikanten Hauptfaktoren umfassen. Dies wird als das Vererbungsprinzip bezeichnet. Hierbei handelt es sich um ein nützliches Prinzip, um die signifikante Wechselwirkung zu ermitteln, wenn diese mit anderen Zwei-Faktor-Wechselwirkungen vermengt ist.

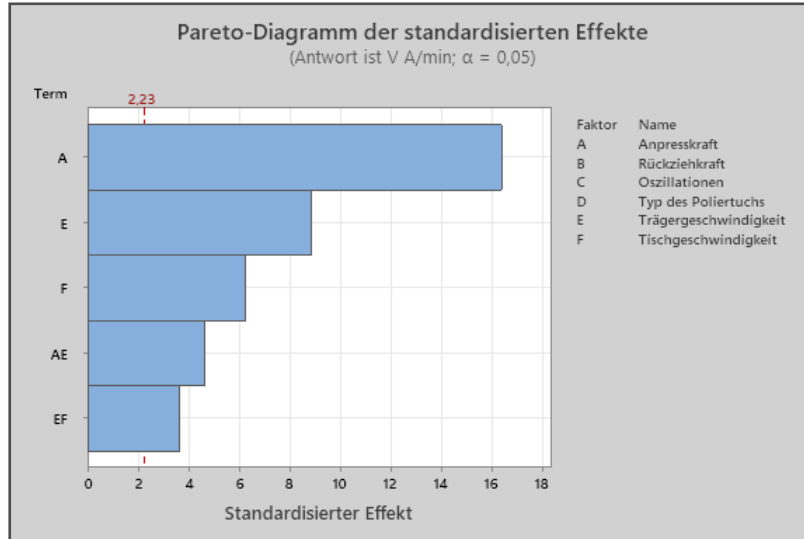
## Den Versuchsplan analysieren

Nun betrachten wir die Analyse der DOE-Ergebnisse, nachdem die eigentlichen Tests durchgeführt wurden. Unser Ziel ist, die Streuung zu minimieren (Antwortvariable StdAbw minimieren), um eine höhere Gleichmäßigkeit bei den Wafern zu erzielen. Gleichzeitig möchten wir die Zykluszeiten minimieren, indem wir die Abtragsrate im Prozess steigern (Antwortvariable  $V A^\circ/min$  maximieren).

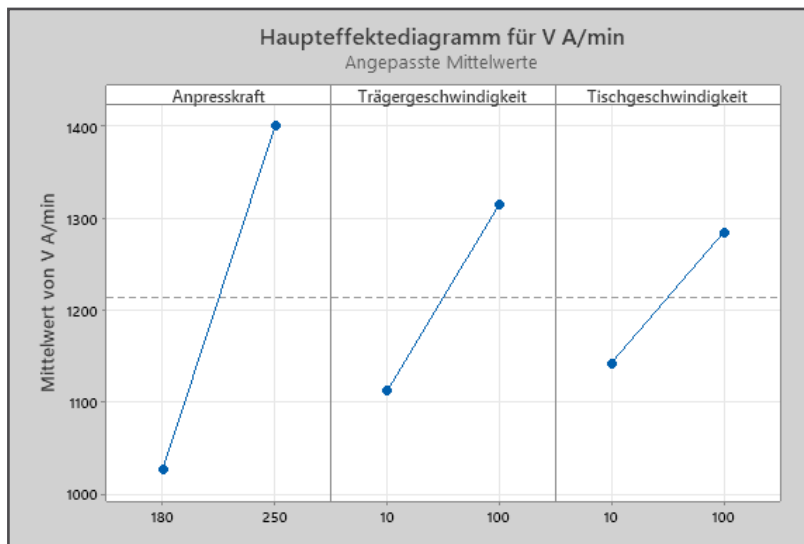
Daher handelt es sich um eine DOE mit mehreren Antwortvariablen.

Anpresskraft	Rückziehkraft	Oszillationen	Typ des Poliertuchs	Trägergeschwindigkeit	Tischgeschwindigkeit	Stdev A	V A/min
180	100	1	0	10	10	175	853
250	100	0	0	10	100	213	1327
180	50	0	0	10	10	142	869
250	100	1	0	100	10	429	1489
180	50	1	0	100	100	753	1099
250	50	1	0	10	100	299	1382
180	100	0	0	100	100	413	1042
180	50	0	1	10	100	535	1090
180	100	0	1	100	10	381	1075
250	100	0	1	10	10	249	1126
180	50	1	1	100	10	552	1085
250	50	1	1	10	10	262	1151
180	100	1	1	10	100	527	1103
250	50	0	1	100	100	552	1558
250	100	1	1	100	100	622	1680

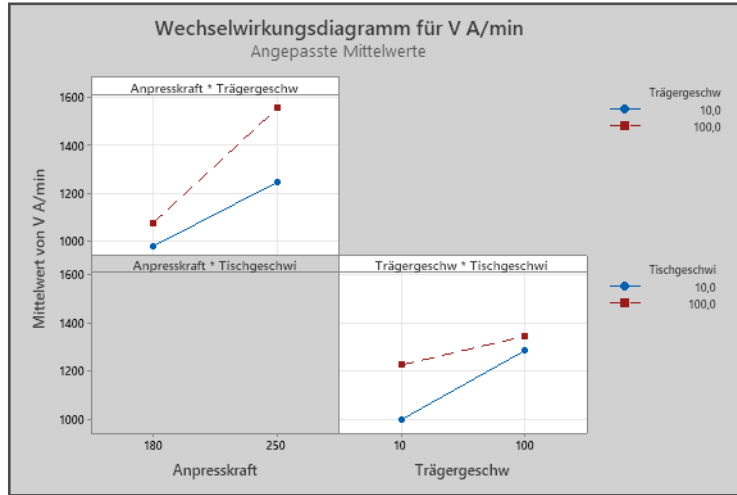
Aus den oben gezeigten DOE-Daten erstellen wir zunächst ein Modell für die Abtragsrate ( $V A^\circ/min$ ): Anpresskraft, Trägergeschwindigkeit und Tischgeschwindigkeit hatten einen signifikanten Effekt, wie das nachfolgende Pareto-Diagramm klar zeigt. Die Zwei-Faktor-Wechselwirkungen Anpresskraft\*Trägergeschwindigkeit und Trägergeschwindigkeit\*Tischgeschwindigkeit waren ebenfalls signifikant. Daher entfernten wir schrittweise die verbleibenden Parameter, die nicht signifikant waren, aus dem Modell.



Ein Prozessexperte bestätigte später, dass diese Effekte und Wechselwirkungen logisch waren und auf der Grundlage unseres aktuellen Wissens zu diesem Prozess erwartbar wären. Die Abbildung unten zeigt die Haupteffektdiagramme (Antwortvariable Abtragsrate).



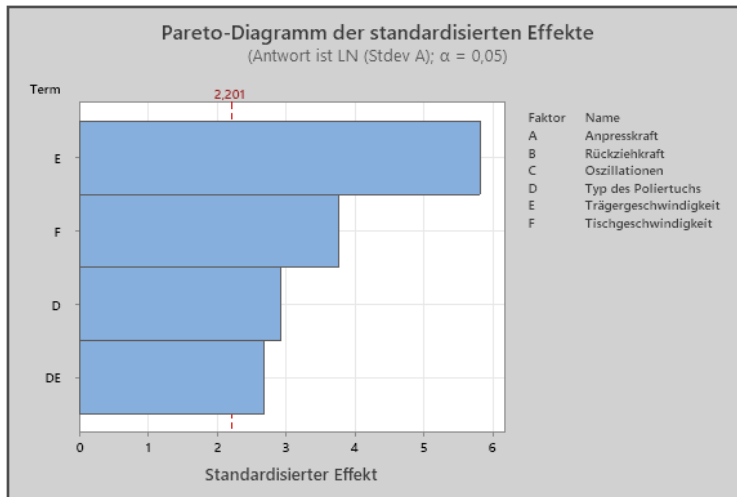
Wir hatten eine teilfaktorielle DOE gewählt, und daher waren mehrere Zwei-Faktor-Wechselwirkungen miteinander vermengt. Aus einem prozessorientierten Blickwinkel waren die Wechselwirkungen Anpresskraft\*Trägergeschwindigkeit und Trägergeschwindigkeit\*Tischgeschwindigkeit jedoch sinnvoller, und außerdem standen diese beiden Wechselwirkungen im Zusammenhang mit äußerst signifikanten Haupteffekten.



Wir erstellen ein zweites Modell für die Antwortvariable StdAbw. Die Standardabweichung folgt nicht zwangsläufig einer Normalverteilung. Daher war eine Log-Transformation erforderlich, um die Daten zur Standardabweichung in eine Normalverteilung zu überführen.

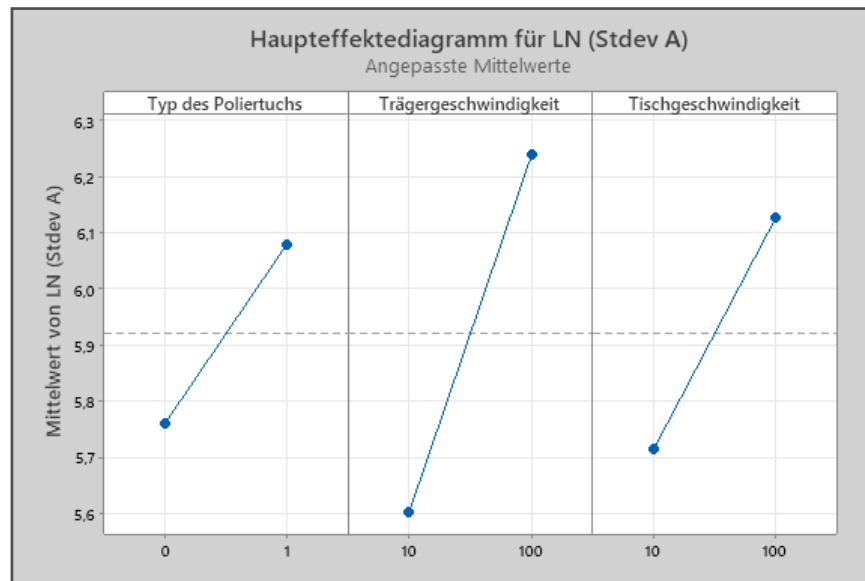
Trägergeschwindigkeit, Poliertuch und Tischgeschwindigkeit sowie die Wechselwirkung Poliertuch\*Trägergeschwindigkeit hatten signifikante Effekte auf den Logarithmus der Antwortvariablen StdAbw, wie im Pareto-Diagramm unten gezeigt.

Auch dies war logisch und bestätigte unsere Kenntnisse des Prozesses.

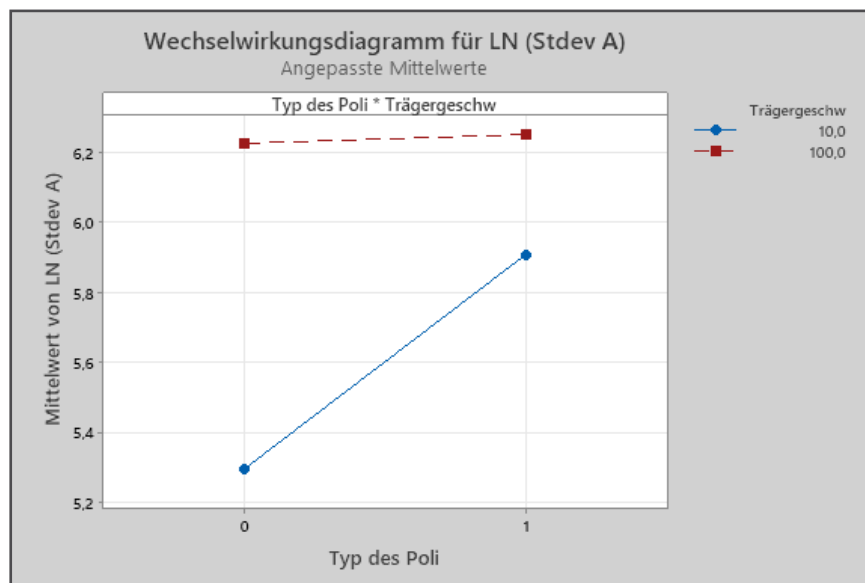




Die Hauptfaktoreffekte werden in der nachfolgenden Abbildung veranschaulicht (Logarithmus der Standardabweichung).



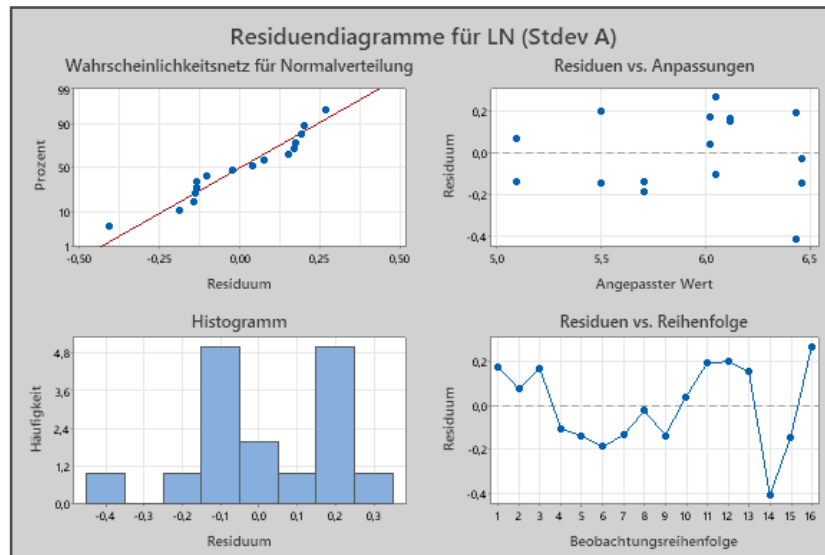
Der Wechselwirkungseffekt wird in der nachfolgenden Abbildung gezeigt (Logarithmus der Standardabweichung).



Dann verglichen wir die Prognosen aus unseren beiden Modellen mit den tatsächlichen Beobachtungen aus den Tests, um die Gültigkeit unseres Modells auszuwerten. Wir wollten Beobachtungen ermitteln, die nicht im Einklang mit unseren Modellen standen. Häufig treten aufgrund von Änderungen an der Prozessumgebung während der Tests Ausreißer auf, die die statistische Analyse verzerren können.

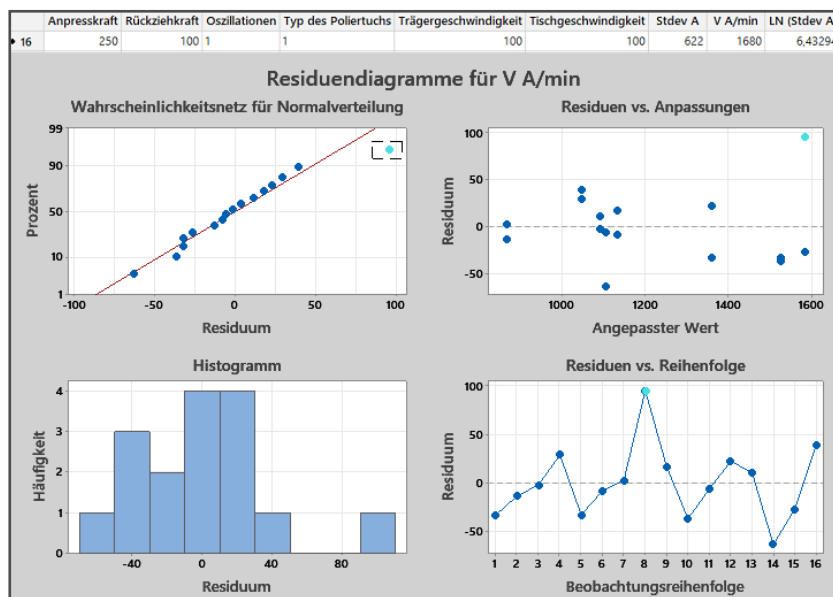


Die Residuendiagramme unten stellen die Differenzen zwischen den tatsächlichen experimentellen Werten und den Prognosen aus dem Modell dar. Minitab bietet vier verschiedene Arten, die Residuen zu betrachten, damit Sie beurteilen können, ob diese Residuen normal und zufällig verteilt sind.



In diesen Diagrammen schienen die Residuen generell zufällig (gezeigt in den Diagrammen rechts, in denen die Residuen im Vergleich zu ihren angepassten Werten und der Beobachtungsreihenfolge dargestellt werden) und normal (gezeigt in dem Wahrscheinlichkeitsnetz links) verteilt zu sein.

Die Beobachtung in Zeile 16 (der blaue Punkt, der in der folgenden Grafik ausgewählt und markiert wurde) sieht im Hinblick auf die Residuen für die Antwortvariable Abtragsrate (V A°) jedoch fraglich aus. Er liegt weit entfernt von den anderen Residuenwerten. Wir nutzten die Markierungsfunktion in Minitab, um weitere Informationen zu diesem Punkt abzurufen (siehe die Werte in der Tabelle unten). Dann entfernten wir die Beobachtung 16 und wiederholten die DOE-Analyse ... doch das endgültige Modell für die Abtragsrate war dem ursprünglichen immer noch sehr ähnlich.



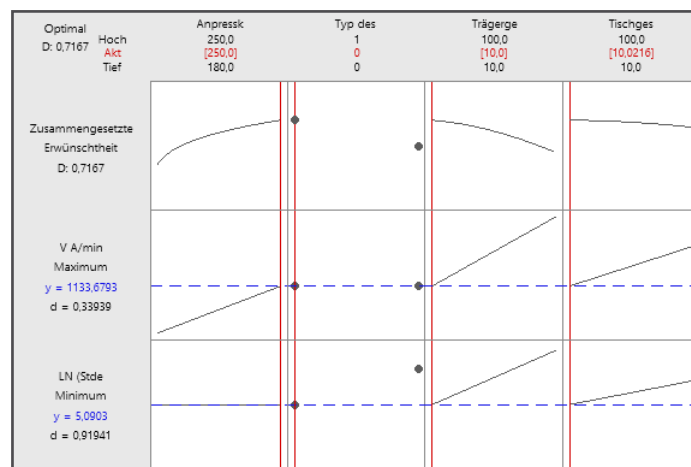
Ausgehend von unseren zwei endgültigen Modellen nutzen wir das Werkzeug für die Prozessoptimierung in Minitab, um ein globales Prozessoptimum zu ermitteln. Das Modell für die Standardabweichung enthielt zwei Terme (V Träger: E; Poliertuch: D; und V Tisch: F), und das Modell für die Abtragsrate (V A°) enthielt drei Terme und einige Wechselwirkungen (Anpresskraft: A; V Träger: E; und V Tisch: F).

Es ist nicht immer leicht, den besten Kompromiss zu finden, wenn widerstreitende Zielsetzungen berücksichtigt werden müssen, insbesondere wenn unterschiedliche Modelle dieselben Parameter enthalten. Es war wichtiger, die Standardabweichung zu reduzieren, um die Ausbeute zu verbessern, als die Zykluszeiten zu verkürzen. Daher wiesen wir der Antwortvariable StdAbw im Optimierungswerkzeug von Minitab eine Bedeutung von 3 und der Antwortvariablen V A° (Abtragsrate) eine Bedeutung von nur 1 zu.

Bis zu 25 Antwortvariablen optimieren:

Antwort	Ziel	Soll
V A/min	Maximieren	
LN (Stdev A)	Minimieren	

Antwort	Ziel	Untergrenze	Soll	Obergrenze	Gewichtung	Bedeutung
V A/min	Maximieren	853	1680	1680	1	1
LN (Stdev A)	Minimieren	4,955827	4,955827	6,624065	1	3



Die Ergebnisse aus dem Minitab-Optimierungswerkzeug weisen darauf hin, dass die Anpresskraft maximiert werden muss, um die Abtragsrate zu steigern (die Zykluszeit zu verkürzen), während sowohl die Träger- und die Tischgeschwindigkeit als auch das Poliertuch niedrig gehalten werden müssen, um eine glattere, gleichmäßigere Oberfläche (eine geringe Standardabweichung) zu erzielen.

Die Bestätigungstests, die mit den von dem Optimierungswerkzeug empfohlenen Einstellungen durchgeführt wurden, waren vereinbar mit den Schlussfolgerungen, die aus der DOE gezogen wurden.

## Schlussfolgerung

Diese DOE hat sich als äußerst effektive Methode herausgestellt, um die Faktoren zu identifizieren, die tatsächlich Auswirkungen hatten, indem diese klar aus dem umgebenden „Prozessrauschen“ herausgearbeitet wurden. Diese Analyse bot uns einen äußerst pragmatischen sowie genauen Ansatz, um den Polierprozess anzupassen und zu optimieren. Die Schlussfolgerungen aus der DOE konnten einfach in den Betrieb übernommen werden.

Legen Sie jetzt los

Sie haben sich jetzt mit den Methoden der Versuchsplanung vertraut gemacht und können diese in Ihrer eigenen Produktionsumgebung anwenden. Denken Sie daran: Das Kernthema bei der Prozessoptimierung ist, nicht zu raten, sondern zu wissen. Mit den richtigen Analysen ist dies ganz einfach.

## Info über Minitab

Dank seiner umfassenden, benutzerfreundlichen und branchenführenden Suite von Werkzeugen für die Datenanalyse und Prozessverbesserung unterstützt Minitab seit 50 Jahren Unternehmen und Organisationen dabei, Kosten zu senken, die Qualität von Produkten und Dienstleistungen zu optimieren und die Kundenzufriedenheit zu steigern. Tausende von Unternehmen und Institutionen weltweit arbeiten wegen unseres einzigartigen integrierten Analyseansatzes mit Minitab. So können Sie bessere Entscheidungen treffen und ausgezeichnete geschäftliche Ergebnisse erzielen.

Haben Sie Interesse an weitergehender Unterstützung bei Ihren Projekten für die Versuchsplanung? Wenden Sie sich an uns, um Hilfe von unseren Statistikexperten, Beratern und dem erstklassigen technischen Support zu erhalten.

## Informationen zum Autor

Dieser Artikel wurde ursprünglich 2016 von Bruno Scibilia verfasst und im Minitab-Blog veröffentlicht. Bruce setzt seit Jahren statistische Methoden für die Qualitätsverbesserung in der Produktion ein und gibt sein erworbenes Wissen zur Qualitätsverbesserung gerne an andere weiter.





## Sie möchten Ihr Know-how in Bezug auf DoE weiter ausbauen?

Dann nehmen Sie an unserem Online-Schulungsblock teil und erfahren Sie, wie Sie Ihre Produkte zeit- und kostengünstig entwickeln und verbessern können.

Dieser Schulungsblock umfasst folgende Minitab Certified Trainings, die abhängig von Ihrem Kenntnisstand auch einzeln gebucht werden können:

- Faktorielle Versuchspläne mit Minitab – “Factorial Designs” am 14. - 15.10.2021
- Wirkungsflächenversuchspläne mit Minitab – “Response Surface Designs” am 18. - 19.10.2021
- Statistische Versuchsplanung in der Praxis – “DoE in Practice” am 21. - 22.10.2021

Nähere Informationen erhalten Sie unter:

[www.additive-academy.de/minitab](http://www.additive-academy.de/minitab)

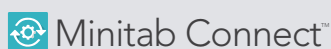
Gerne unterstützen wir Sie auch, wenn Sie eine Schulung mit Ihren eigenen Daten haben möchten. Kontaktieren Sie uns unter: [academy@additive-net.de](mailto:academy@additive-net.de) oder unter +49 (0) 6172-5905-90

Datenanalyse



Leistungsstarke Statistiksoftware für jeden

Datentransformation



Datenzugriff, Automatisierung und Governance für umfassende Einblicke

Prognosemodelle



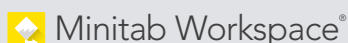
Software für maschinelles Lernen und prädiktive Analysen

Online-Statistikschulung



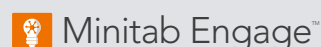
Statistik und Minitab dank Online-Schulungen meistern, jederzeit und überall

Visuelle Werkzeuge für Unternehmen



Visuelle Werkzeuge für herausragende Prozesse und Produkte

Ideenfindung und Realisierung von Projekten



Innovations- und Verbesserungsinitiativen starten, nachverfolgen, verwalten und durchführen