

Philipp POLZ, BSc

Entwicklung eines Prognosemodells zur Bestimmung von Spindelwirkungsgraden mit Hilfe von statistischer Versuchsplanung

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

eines Diplom-Ingenieur

Studienrichtung Maschinenbau

vorgelegt der Fakultät für Maschinenbau und

Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Graz

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Katrin Ellermann

Dipl.-Ing. Mathias Mair

Institut für Mechanik

Technische Universität Graz

Graz, im August 2015

In Kooperation mit:

LOGICDATA, Electronic & Software Entwicklungs GmbH



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)

Kurzfassung

Ziel dieser Diplomarbeit ist die Entwicklung eines empirischen Prognosemodells zur Bestimmung von Spindelwirkungsgraden. Dieses unterstützt die Dimensionierung von Gewindespindeln in der Serienproduktentwicklung von Linearaktuatoren.

Ausgangspunkt für die Untersuchung ist das Berechnungsschema für Gewindewirkungsgrade aus der Lehre der Maschinenelemente. Der Zusammenhang wird durchleuchtet und dessen Schwachstellen werden aufgezeigt.

In nächsten Schritt folgt die Entwicklung einer Prüfumgebung zur Vermessung von Spindeln in unterschiedlichen Dimensionen. Die zu untersuchende Messgröße ist dabei der Wirkungsgrad.

Mit Hilfe von statistischer Versuchsplanung werden relevante Einflussfaktoren auf den Gewindewirkungsgrad gesammelt und daraus systematisch ein Untersuchungsraum abgebildet. Die Durchführung der Versuche erfolgt mit unterschiedlichen Strategien.

Das Ergebnis der Analyse sind empirische Beschreibungsmodelle zur Bestimmung des Wirkungsgrades im zuvor bestimmten Versuchsraum. Mathematische Analysen dienen zur Bewertung der Güte der Modelle. Abschließend werden sie in einer Überprüfungsuntersuchung auf Plausibilität getestet.

Abstract

The aim of this master's thesis is the development of an empirical model to predict the efficiency of spindle systems. The requirement is given by the challenge to introduce a schedule of this parameter in the design of linear actuators.

Analytical calculations of spindle efficiencies based on the theory of machine components are the starting point of this examination. The target is to figure out the weakness of this method.

The next step is to build up a test devise to generate reproducible spindle efficiency measurements of different spindle dimensions at different operating parameters.

In the course of a design of experiments relevant factors, which can have an effect to the efficiency, will be collected and transformed into a design space. Different designs are used to attend the measurements.

Empirical prediction models evaluated by mathematical methods and a verification experiment, are the outcome of this procedure. Subsequently they can be used to get confirmed schedules for spindle efficiencies in the defined design space.

Vorwort

Ich möchte an dieser Stelle allen Personen danken, die mich bei der positiven Absolvierung meines Studiums sowie dieser Arbeit fachlich, physisch und vor allem persönlich unterstützt haben.

Allen voran danke ich meinen Eltern, die mir die Möglichkeit verschafft haben, ein Studium an der technischen Universität Graz zu absolvieren.

Ein besonderer Dank geht an Dipl.-Ing. Dr. techn. Daniel Kollreider für seine Unterstützung als Teamleiter und das Schaffen der Möglichkeit, diese Diplomarbeit im Rahmen meines Dienstverhältnisses abzuschließen.

Weiters danke ich Dipl.-Ing. Mathias Mair für seine professionelle Unterstützung seitens des Instituts für Mechanik.

Zu guter Letzt geht ein spezielles Dankeschön an Frau Jasmin Fabian, BA, die mir während der Ausführung meiner Diplomarbeit bei Korrekturarbeiten, aber vor allem persönlich eine große Stütze war.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2	Stand der Technik	2
1.3	Aufgabenstellung und Vorgehensweise	3
2	Theoretische Grundlagen zu Gewinden	5
2.1	Allgemeines über Bewegungsgewinde	5
2.1.1	Gewindeeigenschaften	5
2.1.2	Gewindekenngößen	6
2.2	Kräfte-situation am Gewinde	9
2.3	Gewindegewirkungsgrad	13
3	Theoretische Grundlagen zur Versuchsplanung	17
3.1	Warum Versuchsplanung?	17
3.2	Statistische Grundlagen	18
3.2.1	Vertrauensbereiche	19
3.2.2	Signifikanz	20
3.3	Grundbegriffe der Versuchsplanung	21
3.3.1	Systeme	21
3.3.2	Zielgrößen	22
3.3.3	Parameter und Faktoren	22
3.3.4	Stufen	24
3.3.5	Effekte	25
3.3.6	Wechselwirkungen	25
3.3.7	Ergebnis einer statistischen Versuchsplanung	28
3.4	Vorgehensweise bei der Versuchsplanung	30
3.4.1	Beschreiben der Ausgangssituation	30
3.4.2	Festlegung des Untersuchungsziels	30
3.4.3	Sammeln der Parameter und Auswahl der Faktoren	31
3.4.4	Festlegung der Faktorstufen	32
3.4.5	Versuchsaufwand festlegen	33
3.4.6	Blockbildung	35
3.4.7	Randomisierung	36

3.4.8	Aufstellen eines Versuchsplans.....	38
3.5	Die Screening Methode.....	38
3.5.1	Grundlagen zu vollfaktoriellen Versuchsplänen.....	38
3.5.2	Aufbau eines vollfaktoriellen Versuchsplans.....	39
3.5.3	Auswertung mittels Mittelwertvergleich.....	40
3.6	Das Response Surface Design.....	41
3.6.1	Standardpläne.....	42
3.6.2	Optimale Pläne.....	42
3.7	Varianzanalyse (ANOVA).....	44
3.8	Regressionsanalyse.....	44
4	Der Prüfaufbau.....	47
4.1	Das Messprinzip.....	47
4.2	Der Prüfstand.....	48
5	Der Screeningversuch.....	51
5.1	Vorgehensweise.....	51
5.2	Ausgangssituation und Zielsetzung des Screenings.....	52
5.3	Bestimmen der Faktoren und Faktorstufen.....	52
5.3.1	Identifikation der Einflussgrößen.....	53
5.3.2	Bewertung der Faktoren.....	54
5.3.3	Faktorstufen.....	55
5.4	Der Versuchsplan.....	58
5.4.1	Anzahl der Realisierungen.....	59
5.4.2	Versuchsdurchführung.....	60
5.5	Ergebnisse und Auswertung.....	60
5.5.1	Mittelwertvergleich.....	63
5.5.2	Interpretation der Haupteffekte.....	64
5.5.3	Interpretation der Wechselwirkungen.....	68
5.5.4	Wirkungsgradmodell.....	69
5.6	Teilfaktorieller Versuchsplan.....	70
5.6.1	Grundlagen.....	70
5.6.2	Der Versuchsplan.....	71
5.6.3	Ergebnisse und Auswertung.....	73

6	Response Surface Design	76
6.1	Der Versuchsplan	76
6.2	ANOVA	79
6.3	Analyse der Residuen	83
6.4	Modellvalidierung.....	84
6.5	Der Verifizierungsversuch.....	87
7	Zusammenfassung	91
	Literaturverzeichnis	93
	Abbildungsverzeichnis	96
	Tabellenverzeichnis	98
	Anhang	100

1 Einführung

Eine wiederkehrende Problemstellung in der Entwicklung von mechatronischen Antriebssystemen für elektronisch verstellbare Möbel, ist die technische Auslegung von Antriebsspindeln für Linearaktuatoren. Die folgende Arbeit beschreibt die Entwicklung eines empirischen Beschreibungsmodells für die Abschätzung der Effizienz von Spindelwirkungsgraden. Dieses Kapitel erläutert die Aufgabenstellung und beschreibt die Herangehensweise zur Lösungsfindung.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Im Bereich von elektronisch verstellbaren Möbeln ist es notwendig, translatorische Bewegungsvorgänge zu erzeugen. Dafür kommen oftmals einfache Spindelsysteme zum Einsatz. Der Antrieb erfolgt über Gleichstrommotoren, welche mit Getriebeeinheiten ein- oder mehrstufig übersetzt werden (siehe Abbildung 1-1).



Abbildung 1-1: Linearantrieb mit Spindelsystem

Im Zuge der Entwicklung dieser Produkte werden aus dem gegebenen Pflichtenheft die Betriebspunkte der Antriebe und damit die Anforderungen an die Spindelsysteme festgelegt. Die wichtigste Kenngröße beschreibt der Wirkungsgrad des Gewindes. Zum einen ist ein hoher Wirkungsgrad erwünscht, um die benötigte Antriebsleistung weitestgehend zu

reduzieren und zum anderen wird häufig die Forderung gestellt, dass das System statische Selbsthemmung aufweisen muss. Statische Selbsthemmung bedeutet, dass unabhängig von der aufgetragenen Belastung, das Gewinde sich nicht selbstständig in Bewegung setzen kann. Der Wirkungsgrad wird nach oben hin begrenzt.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass es bei der Vorabschätzung des Wirkungsgrades zu Problemen kommt. Oftmals stimmt die theoretische Auslegung nicht mit der Realität überein. Dieser Fehler kann erst bei Testvorgängen mit seriennahen Prototypen festgestellt werden. Eine Änderung der Spindelgeometrie ist zu diesem Zeitpunkt mit hohen Aufwänden verbunden. Zum einen würden Kosten für eine Werkzeugänderung entstehen und zum anderen würde zusätzlich der Motorbetriebspunkt verschoben werden, woraus wiederum Änderungskosten resultieren. Es besteht somit nachträglich nur die Möglichkeit, Feinabstimmungen am Reibkontakt zwischen Spindel und Spindelmutter vorzunehmen. Die Stellschrauben hierfür sind das verwendete Schmiermittel und der Mutterwerkstoff. Aus der Empirie weiß man, dass sich diese Abstimmungen als sehr schwierig erweisen und nicht immer positive Ergebnisse liefern.

Um Entwicklungszeit und -kosten zu sparen ist es wesentlich, den erwarteten Wirkungsgrad der Spindel in der Auslegungsphase so exakt wie möglich abschätzen zu können. Aus dieser Problemstellung heraus entstand das Bedürfnis, fundiertes Wissen im Bereich der Spindeltribologie aufzubauen und daraus eine Vorhersagemethodik für die Effizienz von Spindelsystemen abzuleiten.

1.2 Stand der Technik

Die technische Auslegung der Spindeln erfolgt über die Lehre der Bewegungsschrauben aus dem Bereich der klassischen Maschinenelemente, beschrieben in [5, p. 214ff] [6, p. 235ff] [11, p. 324ff] [14, p. 391ff] [21, p. 259ff]. Es existiert folglich ein analytisches Berechnungsmodell für Spindelwirkungsgrade, dessen genauer Zusammenhang im Kapitel 2 näher beschrieben wird. Dieses Modell stützt sich sowohl auf geometrische, exakte Zusammenhänge, als auch auf den empirisch bestimmten Reibwert. Diese Erfahrungswerte bergen ein gewisses Fehlerpotenzial.

Die Bestimmung des Reibwertes für den Gewinde – Gewindemuttern Kontakt geschieht im Allgemeinen über bekannte Tabellenwerte. Kommen vor allem Polymere als

Mutterwerkstoff zum Einsatz, liegen meist keine brauchbaren Werte mehr vor. Grund dafür ist vor allem die unzählige Menge an am Markt angebotenen Kunststoffcompounds. Kommt zusätzlich ein Schmierstoff zum Einsatz, wird die Bestimmung weiter erschwert. In den meisten Fällen muss der Reibwert unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors vom Hersteller angegebenen Wert im Datenblatt geschätzt werden.

Die Qualität des theoretischen Wirkungsgradmodells hängt von der Genauigkeit der Reibwertschätzung ab und ist daher mit großer Unsicherheit behaftet.

1.3 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

Ausgehend von der beschriebenen Problemstellung soll im Zuge dieser Arbeit ein empirisches Modell zur Bestimmung des Gewindegewinns entwickelt werden.

Im ersten Schritt muss eine Prüfumgebung geschaffen werden, mit der die Effizienz von Spindeln reproduzierbar zu bestimmen ist. Bewegungsgewinde sollen in unterschiedlichen Dimensionen und unter verschiedenen Betriebsbedingungen vermessbar sein.

In weiterer Folge werden relevante Einflussgrößen auf den Wirkungsgrad recherchiert und gesammelt. Ausgehend von den bei LOGICDATA vorhandenen Anwendungsfällen, wird daraus ein Versuchsraum abgesteckt, den es zu analysieren gilt.

Mit Hilfe von statistischer Versuchsplanung wird der festgelegte Versuchsraum in mehreren Testreihen durchleuchtet. Einerseits um den Detaillierungsgrad sukzessive zu erhöhen, andererseits um die Stärken und Schwächen verschiedener Versuchsplanungsmethoden zu qualifizieren. Damit wird ebenfalls Know-how im Bereich der Versuchsplanung aufgebaut.

Die Erkenntnisse dieser Untersuchungen werden im nächsten Schritt in mathematische Beschreibungsmodelle gegossen. Es kommt die Methode der linearen Regressionsanalyse zur Anwendung. Ein Vergleich der resultierenden Modelle liefert Aufschluss über die Qualität der Untersuchungen und der verschiedenen Vorgehensweisen.

Ziel der Arbeit ist es, abschließend die Vorhersagefähigkeit dieser Modelle zu vergleichen und zu bewerten. Mit dem effizientesten dieser Modelle soll eine zukünftige Wirkungsgradschätzung wesentlich verbessert werden. Durch die statistische Bewertung dieses Modells ist dessen Aussage im Vorfeld abgesichert. Außerdem soll damit das

Verständnis für das Verhalten der Effizienz, bei Veränderung der Einflussfaktoren, stark erhöht werden.

2 Theoretische Grundlagen zu Gewinden

Wie oben beschrieben ist die Entwicklung eines entsprechenden Prüfaufbaus zur Vermessung der Effizienz von Bewegungsgewinden der Ausgangspunkt für die gesamte Untersuchung. Aufbauend auf die begrifflichen Grundlagen beschreiben die nächsten Seiten den Gewindewirkungsgrad mit allen Einflussfaktoren und theoretischen Grenzen. In weiterer Folge wird daraus ein Prüfkonzept abgeleitet und ein Prüfaufbau entwickelt.

2.1 Allgemeines über Bewegungsgewinde

Im Gegensatz zu Befestigungsschrauben, welche zum Ziel haben die Befestigung von Bauteilen zu gewährleisten, dienen Bewegungsschrauben der Erzeugung von Übersetzungen. Sie sind im Betrieb ständigen Bewegungsvorgängen ausgesetzt, wohingegen Befestigungsgewinde ausschließlich bei der Montage und Demontage bewegt werden. Aus diesem Grund werden Bewegungsgewindetriebe häufig als Schraubgetriebe und die verwendeten Schrauben als Spindeln bezeichnet. Man unterscheidet Kraftübersetzungen (wandeln von Umfangskräften in Längskräfte oder umgekehrt) und Wegübersetzungen (wandeln von Drehbewegungen in Längsbewegungen oder umgekehrt). [14, p. 391]

2.1.1 Gewindeeigenschaften

Abgeleitet aus der Funktion, die das Schraubgetriebe erfüllen soll, ergeben sich unterschiedliche Anforderungen. Im Speziellen sind Eigenschaften wie Wirkungsgrad, Selbsthemmung, Selbstbremsung und Übersetzung von großer Bedeutung. [14, p. 391]

- **Wirkungsgrad:** Der Wirkungsgrad η eines Gewindes ist der Quotient aus abgegebener und aufgenommener Energie. Die Differenz der beiden Energien geht als Reibungsenergie (Dissipationsenergie) im Gewinde verloren.
- **Selbsthemmung:** Ein Gewinde ist selbsthemmend, wenn im Ruhezustand beliebig große äußere Axialkräfte, welche auf die Spindel oder die Mutter wirken, kein (Los-)Drehmoment erzeugen können. [20, p. 4]
- **Selbstbremsung:** Ein Gewinde ist selbstbremsend, wenn im Laufzustand unter Ausfall des Antriebsmoments, beliebig große äußere Axialkräfte auf die Spindel oder Mutter wirkend, kein selbstständiges weiterdrehen des Gewindes erzwingen. Die

Dissipationsenergie im Gewinde ist größer als die von der Spindel zugeführte Energie.

Die Gleitreibung geht langsam in die Haftreibung über. [14, p. 454] [20, p. 4]

- Übersetzung: Die Übersetzung gibt an in welchem Ausmaß Drehmoment (Kraft) bzw. Drehbewegung (Hub) vom Gewinde übersetzt werden.

2.1.2 Gewindekenngößen

Für die Bestimmung dieser Größen sind mehrere Kenngrößen ausschlaggebend, wie Abbildung 2-1 und Abbildung 2-2 erkennen lassen. [5, p. 174ff] [14, p. 397ff] [21, p. 219]

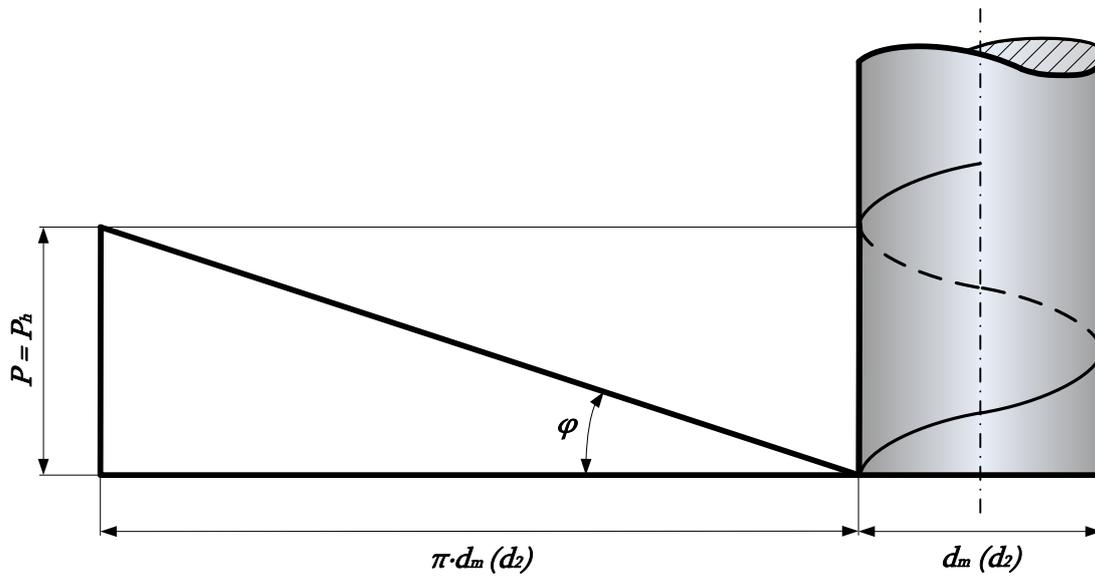


Abbildung 2-1: Schraubenlinie und Abwicklung eines eingängigen Gewindes

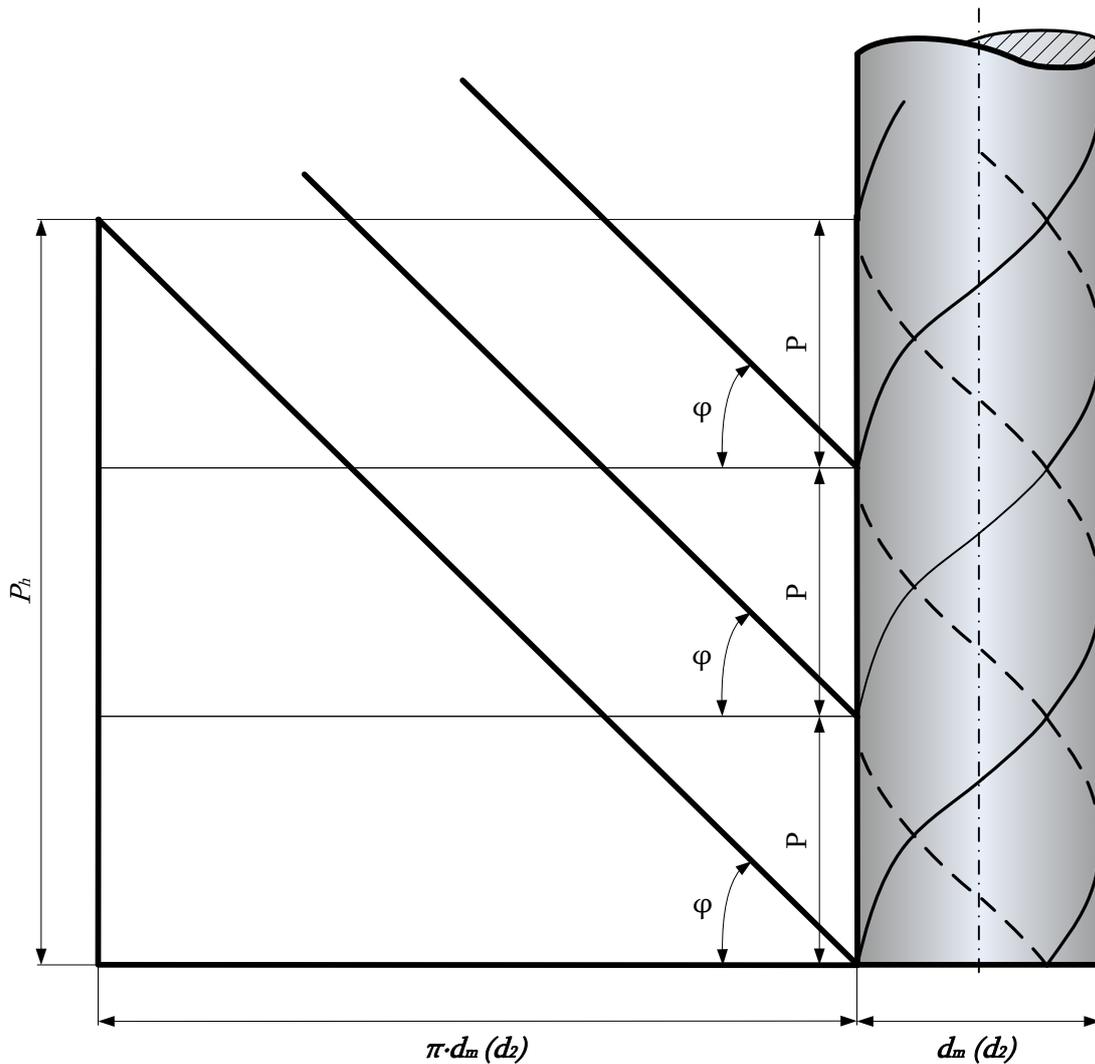


Abbildung 2-2: Schraubenlinie und Abwicklung eines mehrgängigen Gewindes

Teilung P :

Ein Gewinde entsteht, wenn man eine Keilfläche mit der Höhe P um eine Zylindermantelfläche mit dem Durchmesser d_m aufwickelt. Somit beschreibt P den Abstand von zwei Gewindeflanken in Achsrichtung. Zur Berechnung von Gewinden wird der mittlere Durchmesser des Gewindes, der sogenannte Flankendurchmesser d_2 (siehe Abbildung 2-8), herangezogen.

Gangzahl n :

Die Gangzahl ist die Zahl der auf der Spindel vorhandenen Gewindegänge. Man unterscheidet zwischen ein- und mehrgängigen Gewinden.

Steigung P_h :

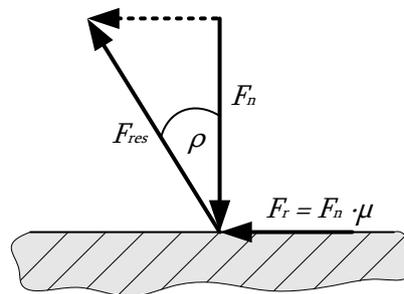
Die Steigung beschreibt den Weg den die Spindelmutter zurücklegt, wenn die Spindel um eine volle Umdrehung (360°) verdreht wird. Bei mehrgängigen Gewinden gilt $P_h = n \cdot P$, somit resultiert für eingängige Gewinde $P_h = P$.

Steigungswinkel φ :

Der Steigungswinkel beschreibt den Winkel der Schraubenlinie am Durchmesser. Wird die Schraubenlinie abgewickelt, erscheint der Steigungswinkel, in der dargestellten Keilfläche, in wahrer Größe. Daraus ergibt sich der einfache trigonometrische Zusammenhang $\tan \varphi = \frac{P_h}{\pi \cdot d_2}$.

Reibungswinkel ρ :

Der Reibungswinkel ist jener Winkel, welcher durch Normalkraft und Reibkraft in einem Krafteck aufgespannt wird. Wie in Abbildung 2-3 dargestellt, ergibt sich durch den Reibkoeffizienten μ für den Reibwinkel $\tan \rho = \mu$.

Abbildung 2-3: Der Reibwinkel ρ

Da die Wegübersetzung in einem Gewinde schlupffrei passiert, kann diese über den geometrischen Zusammenhang exakt festgelegt und analytisch bestimmt werden. Wie oben erwähnt, wird die Mutter durch eine Umdrehung $\pi \cdot d_2$ um die Gewindesteigung P_h in axialer Richtung verschoben. Für die Wegübersetzung gilt

$$\frac{\pi \cdot d_2}{P_h} = \frac{1}{\tan \varphi}. \quad (2.1)$$

Je größer die Steigung und somit der Steigungswinkel, desto größer wird die Wegübersetzung und desto sensibler wird das Gewinde. [14, p. 402]

Anders sieht es bei der Kraftübersetzung, Selbstbremsung, Selbsthemmung und dem Wirkungsgrad aus. Diese Größen sind neben dem geometrischen Zusammenhang ebenfalls

vom Dissipationsterm, also vom Reibkoeffizienten μ im Gewinde, abhängig. Das macht eine exakte Berechnung dieser Eigenschaften schwierig. Der Reibwert hängt von vielen Einflussparametern ab und kann nur näherungsweise aus Tabellensammlungen oder Erfahrungswerten bestimmt werden. Für viele Anwendungen ist diese Abschätzung vollkommen ausreichend. Will man jedoch, wie im betreffenden Anwendungsfall, eine optimale Abstimmung zwischen Wirkungsgrad und Selbsthemmung erzielen, ist eine exakte Bestimmung dieser Größen entscheidend. Aus diesem Grund werden diese Zusammenhänge in den nächsten Seiten näher erläutert.

2.2 Kräftesituation am Gewinde

Zur Darstellung der Kräfte am Gewindegang wird das in Abbildung 2-4 gezeigte vereinfachte Mutternelement am Flankendurchmesser d_2 betrachtet. Zur weiteren Vereinfachung wird ein Flankenwinkel von $\alpha = 0^\circ$ angenommen. Das bedeutet, dass die Gewindeflanke mit der Schraubenlängsachse einen Winkel von 90° einschließt.

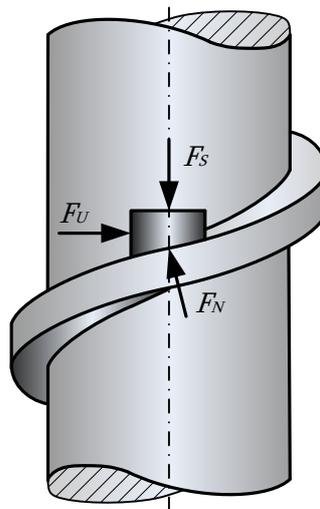


Abbildung 2-4: Kräftesituation am vereinfachten Gewinde

Die Hubkraft F_S beschreibt die Belastung der Schraube in Richtung der Schraubenlängsachse. Durch das Drehmoment M_A , das aufzubringen ist um eine Bewegung zu erzeugen, resultiert am Mutternelement die Umfangskraft $F_U = \frac{2 \cdot M_A}{d_2}$. Daraus ergibt sich die resultierende Kontaktkraft F_N zwischen Mutternelement und Gewindegang. Wird das Gewinde nun abgewickelt, ergibt sich das in Abbildung 2-5 gezeigte Krafteck. Für den dargestellten idealen reibungsfreien Fall ($\mu = 0$) folgt für die Umfangskraft

$$F_U = F_S \cdot \tan \varphi . \quad (2.2)$$

Somit ist die Kraftübersetzung gleich der Wegübersetzung:

$$\frac{F_S}{F_U} = \frac{1}{\tan \varphi} . \quad (2.3)$$

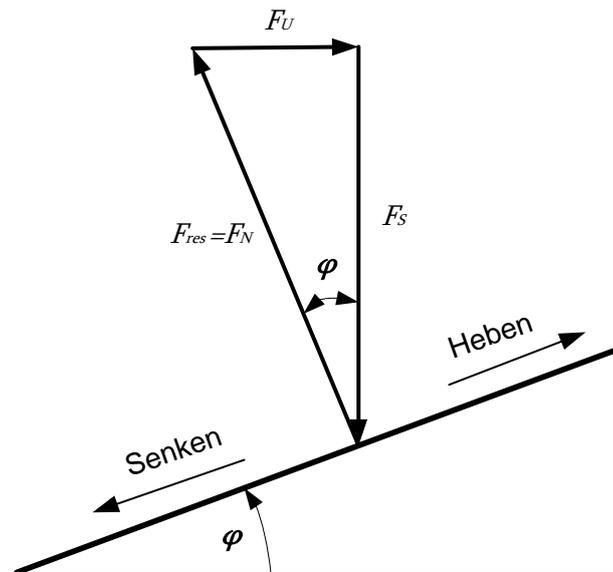


Abbildung 2-5: Kraftsituation am Mutternelement im reibungsfreien Fall

Im reibungsbehafteten Fall wirkt die Reibkraft $F_N \cdot \mu$ stets der Bewegungsrichtung entgegen. Für ein nicht selbsthemmendes Gewinde können somit die in Abbildung 2-6 dargestellten Kraftbilder für den Hub- und Senkvorgang hergeleitet werden. Die äußeren Kräfte F_U und F_S müssen über die resultierende Kraft F_{res} mit den inneren Kräften F_N und $F_R = F_N \cdot \mu$ im Gleichgewicht sein. Somit ergibt sich für die Umfangskraft im Hubvorgang

$$F_U = F_S \cdot \tan(\varphi + \rho) \quad (2.4)$$

und im Senkvorgang

$$F_U = F_S \cdot \tan(\varphi - \rho) . \quad (2.5)$$

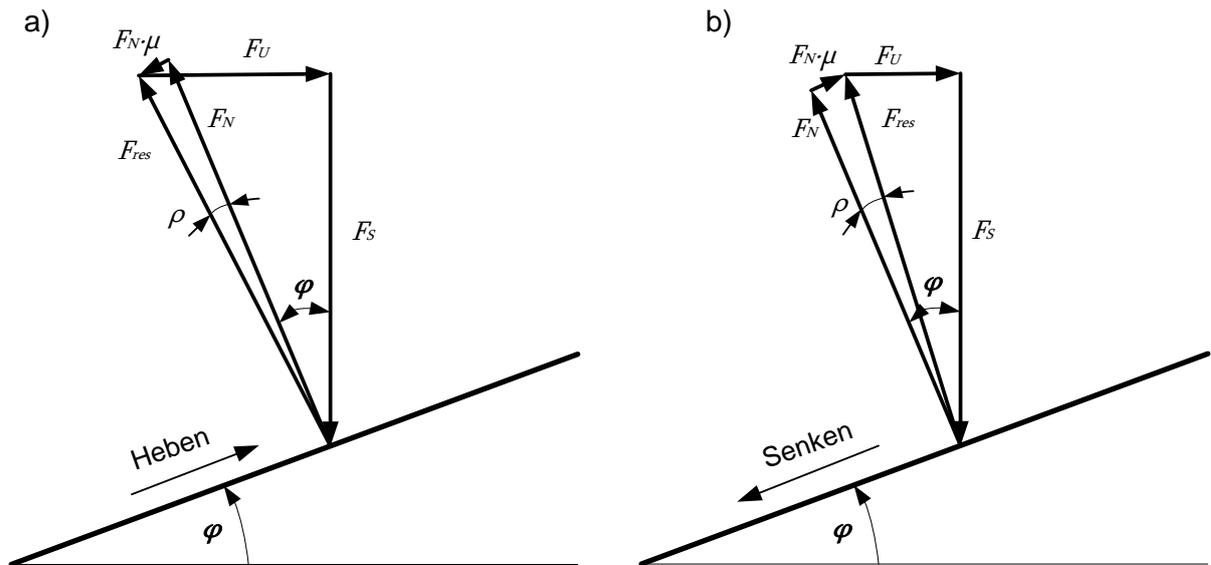


Abbildung 2-6: (a) Kraftsituation am Mutternelement für einen Hubvorgang für ein nicht selbsthemmendes Gewinde, (b) Kraftsituation am Mutternelement für einen Senkvorgang für ein nicht selbsthemmendes Gewinde

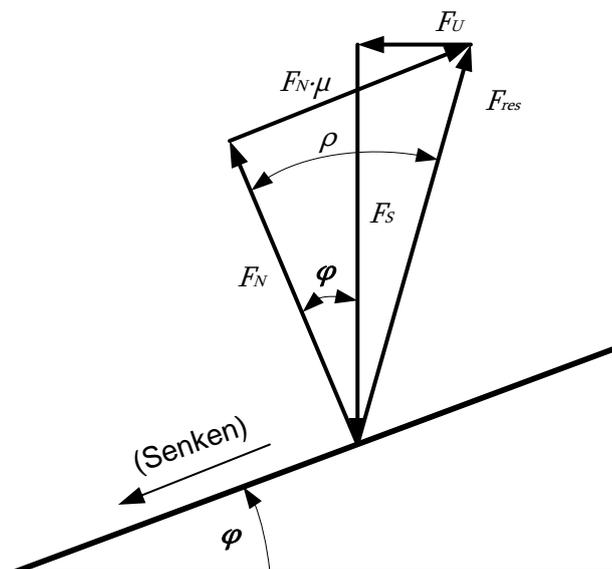


Abbildung 2-7: Kraftsituation am Mutternelement für einen Senkvorgang für ein selbsthemmendes Gewinde

Wird der Reibwinkel ρ größer als der Steigungswinkel φ bedeutet das, dass zum Senken (Lösen) der Mutter eine Kraft F_U in Bewegungsrichtung aufgewendet werden muss. Diesen Fall zeigt Abbildung 2-7. Das Gewinde ist selbsthemmend (siehe Definition unter Abschnitt 2.1.1). Die Umfangskraft im Senkvorgang berechnet sich somit für selbsthemmende Flachgewinde ($\alpha = 0^\circ$) als

$$F_U = F_S \cdot \tan(\rho_0 - \varphi) . \quad (2.6)$$

Selbsthemmung kann sich stets nur im statischen (ruhenden) Zustand einstellen. In Gleichung (2.6) muss somit der Haftreibwinkel ρ_0 , resultierend aus der Haftreibzahl μ_0 , eingesetzt werden. Für nicht selbsthemmende Gewinde muss in Abhängigkeit davon ob das Gewinde in Bewegung ist oder nicht, entsprechend die vorhandenen Haftreibzahl μ_0 oder Gleitreibzahl μ in die Berechnungen eingesetzt werden. [14, p. 403f] [11, p. 294f]

Aus fertigungstechnischen Gründen werden Flachgewinde in der Praxis nur sehr selten eingesetzt. Stattdessen kommen Gewinde mit geneigten Flanken zum Einsatz, beispielsweise Spitzgewinde oder Trapezgewinde. Dies bedeutet, dass die Gewindeflanken, wie in Abbildung 2-8 veranschaulicht, einen Flankenwinkel $\alpha > 0^\circ$ besitzen.

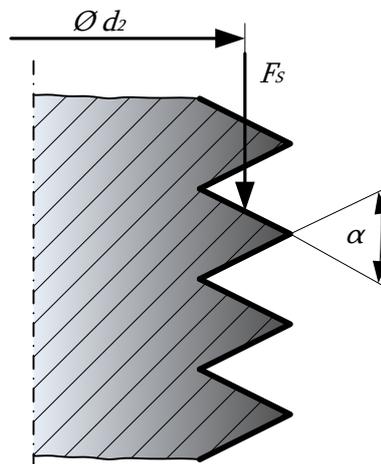


Abbildung 2-8: Der Flankenwinkel α

Da für den Reibkontakt die senkrecht auf die Gewindeflanke stehende Kraft entscheidend ist und diese nun zusätzlich um den halben Flankenwinkel geneigt ist, ergeben sich für Gewinde mit Flankenwinkel höhere Reibkräfte als bei Flachgewinden. Um die Berechnung nicht zu verkomplizieren, wird dieser Zusammenhang mithilfe einer scheinbaren Reibzahl

$$\mu' = \mu \cdot \sqrt{1 + \cos^2 \varphi \cdot \tan^2 \frac{\alpha}{2}} \quad (2.7)$$

abgebildet. Für das Verständnis des genauen geometrischen Zusammenhanges wird an dieser Stelle an einschlägige Literatur verwiesen. Analog zu $\tan \rho = \mu$ gilt hier $\tan \rho' = \mu'$ und für die Berechnung der Umfangskraft entsprechend die Gleichungen (2.4), (2.5) und (2.6). [14, p. 403f] [6, p. 236f] [11, p. 295f]

2.3 Gewindewirkungsgrad

Wie Abschnitt 2.1 beschreibt, ist der Wirkungsgrad η im Allgemeinen als der Quotient aus abgegebener und aufgenommener Energie definiert. Also:

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{W_n}{W_a} \quad (2.8)$$

Betrachtet man eine volle Gewindeumdrehung während des Hubvorganges, ist die Nutzarbeit W_n eines Gewindes jene Arbeit die verrichtet wird, wenn man die Last F_S um die Steigung P_h in Achsrichtung bewegt (siehe Abbildung 2-9).

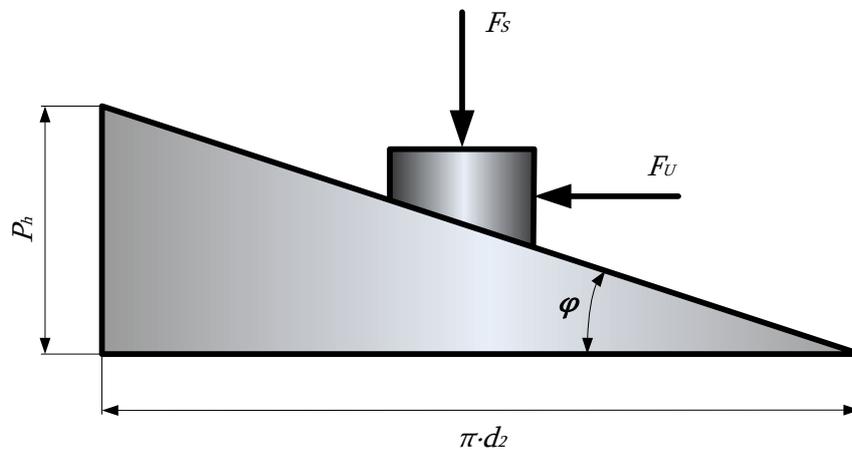


Abbildung 2-9: Mutternelement am Gewindekeil

Somit ergibt sich für die Nutzarbeit

$$W_n = F_S \cdot P_h. \quad (2.9)$$

Um dies zu bewerkstelligen muss die Umfangskraft F_U das Mutternelement um den gesamten Umfang $d_2 \cdot \pi$ verschieben. Der Aufwand kann damit als

$$W_a = F_U \cdot d_2 \cdot \pi \quad (2.10)$$

berechnet werden. Daraus ergibt sich für den Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{F_S \cdot P_h}{F_U \cdot d_2 \cdot \pi}. \quad (2.11)$$

Mit Gleichung (2.4) eingesetzt in (2.11) und $\tan \varphi = \frac{P_h}{d_2 \cdot \pi}$ folgt

$$\eta = \frac{F_S \cdot P_h}{F_S \cdot \tan(\varphi + \rho') \cdot d_2 \cdot \pi} \quad (2.12)$$

$$\eta = \frac{F_S}{F_S \cdot \tan(\varphi + \rho')} \cdot \frac{P_h}{d_2 \cdot \pi} \quad (2.13)$$

$$\eta = \frac{\tan \varphi}{\tan(\varphi + \rho')} \quad (2.14)$$

Für nicht selbsthemmende Gewinde kann auch für den Senkvorgang ein Wirkungsgrad berechnet werden. Dabei wird eine Längskraft in ein Drehmoment umgewandelt. Folglich werden Nutzen und Aufwand vertauscht und es gilt

$$\eta = \frac{F_U \cdot d_2 \cdot \pi}{F_S \cdot P_h} \quad (2.15)$$

Mit Gleichung (2.5) ergibt sich für den Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{\tan(\varphi - \rho')}{\tan \varphi} \quad (2.16)$$

Abbildung 2-10 stellt die Wirkungsgrade aus (2.14) und (2.16) für ein Spitzgewinde ($\alpha = 60^\circ$) grafisch in Abhängigkeit des Steigungswinkels φ dar. Der Reibwert wurde mit $\mu = 0,08$ ($\rho' = 4,9^\circ$) angenommen. Wie unter Abschnitt 2.2 beschrieben ist bei selbsthemmenden Gewinden der Reibwinkel ρ' stets größer als der Steigungswinkel φ . Umgekehrt gilt bei nicht selbsthemmenden Gewinden $\rho' < \varphi$. Für den Grenzfall $\rho' = \varphi$ folgt mit Gleichung (2.14) der mathematische Zusammenhang $\eta = \frac{\tan \varphi}{\tan(2\varphi)}$, welcher in Abbildung 2-10 als Selbsthemmungsgrenze dargestellt ist. Es ist zu erkennen, dass der Wirkungsgrad sich für kleine Steigungswinkel asymptotisch gegen 50% nähert. Für selbsthemmende Gewinde gilt somit immer $\eta \leq 50\%$. Für zunehmende Steigungen fällt der Wirkungsgrad ab.

Bei Steigungswinkeln, welche rechts des Schnittpunktes der Wirkungsgradlinie für den Hubvorgang η_H mit der Selbsthemmungsgrenze liegen, existiert darüber hinaus ein Wirkungsgrad für den Senkvorgang η_S . Bei kleineren Steigungswinkeln ist dieser 0, da keine Bewegung stattfindet. [5, p. 211ff] [14, p. 404ff] [19, p. 278ff] [21, p. 264]

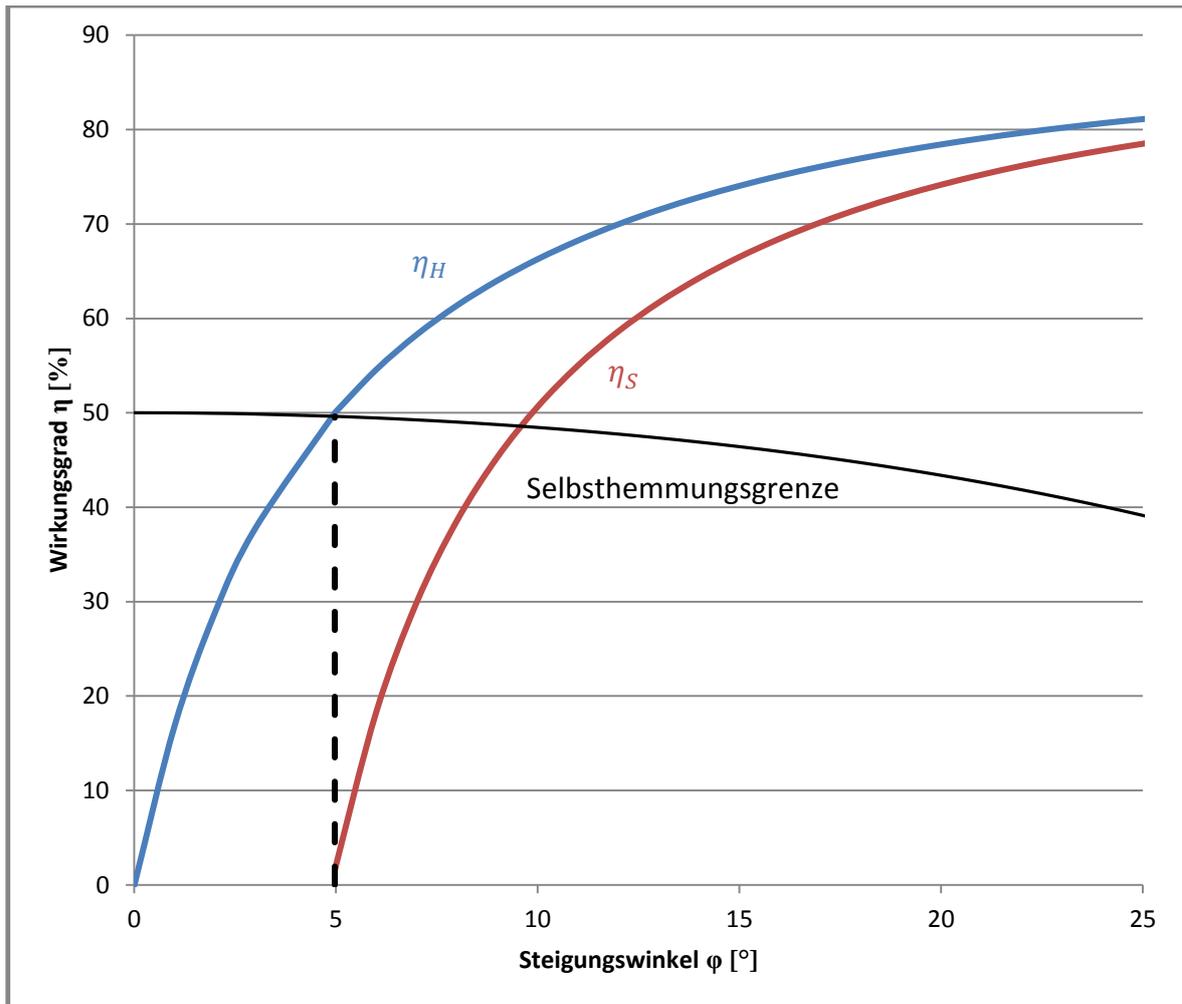


Abbildung 2-10: Gewindewirkungsgrad beim Heben und Senken für $\mu=0,08$

Um in der Anwendung einen exakten Wirkungsgrad bestimmen zu können, ist folglich die Kenntnis des Reibwertes Voraussetzung. In der Regel wird vereinfachend meist ein Reibwert, in Abhängigkeit der Materialpaarung und des Schmierzustandes, aus diversen Tabellensammlungen entnommen und dieser als konstant für alle Betriebsbedingungen angenommen. Für die Auslegung von Befestigungsschrauben ist dieses Vorgehen vollkommen ausreichend. Zum einen sind Befestigungsgewinde durch ihre geringen Steigungswinkel in der Praxis immer selbsthemmend und zum anderen werden sie meist mit Sicherheitsfaktoren ausgelegt, was eine exakte Kenntnis des Reibwertes nicht notwendig macht.

Anders sieht es bei Bewegungsgewinden aus. Hier spielt der Wirkungsgrad eine entscheidende Rolle, da er direkt das notwendige Antriebsmoment bestimmt. Gleichzeitig ist die Forderung nach Selbsthemmung für viele Anwendungen zwingend. Aus diesem Grund ist es nicht ausreichend, einen konstanten Reibwert vorauszusetzen. In der Praxis wird das

Verhalten stark von Betriebsbedingungen wie zum Beispiel der Hubgeschwindigkeit, der Umgebungstemperatur und der Hubkraft beeinflusst. Es besteht also die Möglichkeit, dass ein und dasselbe Gewinde unter verschiedenen Bedingungen verschiedene Wirkungsgrade aufweist. Ein weiteres Problem ist die fehlende Information über verwendete Materialpaarungen und Schmiermittel. Vor allem wenn Kunststoffe als Mutterwerkstoff zum Einsatz kommen, ist durch die Vielzahl der existierenden Kunststoffe eine Aussage über den Reibwert meist nur qualitativ möglich. Durch zusätzlichen Schmiermitteleinsatz wird das Treffen dieser Aussagen weiter erschwert.

3 Theoretische Grundlagen zur Versuchsplanung

Es ist grundsätzlich sinnvoll bei Untersuchungen im Zuge von Entwicklungs- und Forschungstätigkeiten den Aufwand zu minimieren um in kurzer Zeit möglichst viel Information über das zu untersuchende Objekt zu erhalten. Zu Beginn einer Untersuchung ist meist die Anzahl der Einflussvariablen groß und der Zusammenhang zwischen Input und Output gänzlich unbekannt. Die statistische Versuchsplanung ist ein Werkzeug, welches die Bewältigung solcher Aufgaben zum Ziel hat. Sie liefert großen Informationsgehalt bei minimalem Aufwand an Zeit und Kosten. Man erhält statistisch bewertete und abgesicherte Versuchsergebnisse. Das folgende Kapitel beschreibt die Grundlagen dieser Methode die notwendig sind, um einfache Versuchspläne aufzustellen und in weiterer Folge auswerten zu können. [4, p. 5] [8, p. 1] [17, p. 19]

3.1 Warum Versuchsplanung?

Die statistische Versuchsplanung, oder Design of Experiments (kurz DoE), beschreibt eine Methode, welche auf die Erhöhung der Effizienz von Versuchsreihen abzielt. Dabei wird in der Planung der Versuche und in der Verarbeitung der Ergebnisse auf statistische Werkzeuge zurückgegriffen. Im späteren 19. Jahrhundert kam es zum weltweiten Durchbruch der Methode, jedoch wird sie heute noch in vielen Ingenieurausbildungen vermisst. Abhängig vom breit gefächerten Einsatzgebiet sind die mathematischen Anforderungen für eine statistische Versuchsplanung unterschiedlich komplex. Mit Hilfe von unzählig angebotenen Softwarepaketen, die sich mit dieser Thematik beschäftigen, wird uns diese Herausforderung größtenteils abgenommen. Trotzdem ist es essentiell die Werkzeuge, die diese Methode verwendet, grundlegend zu verstehen, um sie erfolgreich einzusetzen. In weiterer Folge können Lösungen interpretiert und zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden.

Die am häufigsten verwendeten Versuchspläne gestalten sich prinzipiell einfach und die Anwendung ist nicht übermäßig schwierig. Es sind andere Sachverhalte, die das Gesamtpaket der Planung zur Herausforderung machen. Effekte wie die Teststreuung erschweren die Interpretation von Ergebnissen. Die Umsetzung von Versuchen ist in der Realität oft mit viel Aufwand verbunden bzw. sind unter Umständen bestimmte Versuche gar nicht durchführbar, da sie Randbedingungen durchbrechen. Weiters ist die Größe der

benötigten Stichprobe häufig nicht bekannt. Wie viele Versuche müssen durchgeführt werden um echte Effekte von unechten Effekten in der gewünschten Genauigkeit zu erkennen? Alles das sind Fragestellungen, die die Verwendung von Statistik unausweichlich und den Einsatz des Design of Experiments sinnvoll machen. [8, p. 2f] [18, p. 1f]

3.2 Statistische Grundlagen

Zu Beginn ist es notwendig, auf einige statistische Grundlagen näher einzugehen. Die folgenden Abschnitte bauen auf diese Grundlagen auf.

Da Messwerte naturgemäß mit einer Streuung behaftet sind, kann der wahre Wert einer Zielgröße nicht exakt bestimmt werden. Diese Streuung ist meist ein Resultat vieler Einflüsse und unterliegt dem Zufall. Die Grundgesamtheit von Messwerten folgt einer Verteilungsfunktion, welche in technischen Prozessen oft als gute Näherung durch die Normalverteilung beschrieben werden kann. Diese Prämisse ist Voraussetzung für die Anwendung des Mittelwertvergleichs. Bestehen Zweifel an dieser Annahme, sollte im Vorfeld eine Untersuchung auf Normalverteilung gemacht werden. Dafür existieren verschiedene Methoden wie zum Beispiel das Wahrscheinlichkeitsnetz oder der χ^2 - Test, auf welche hier nicht näher eingegangen wird. Gegebenenfalls muss dann eine Transformation der Daten durchgeführt werden. [8, p. 70ff]

Ist die Grundgesamtheit normalverteilt, kann die Verteilungsfunktion durch zwei Parameter beschrieben werden:

- Die Lage der Verteilung, repräsentiert durch den Mittelwert μ
- Die Breite der Verteilung, repräsentiert durch die Standardabweichung σ (bzw. durch die Varianz σ^2)

In der Realität kennt man jedoch meist nicht die volle Grundgesamtheit, sondern nur eine zufällig entnommene Stichprobe, welche die Grundgesamtheit repräsentiert. Aus dieser Stichprobe versucht man etwas über die Grundgesamtheit herauszufinden. Die Gleichung

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.1)$$

beschreibt den Schätzwert für den wahren Mittelwert μ aus den n Messwerten y_i und

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.2)$$

berechnet den Schätzwert für die Varianz σ^2 der Verteilung. Da Stichproben, also die Messwerte y_i , dem Zufall unterliegen, unterliegen auch die daraus errechneten Schätzwerte dem Zufall. Jede Stichprobe liefert einen anderen Mittelwert und eine andere Varianz. Beide Eigenschaften sind „erwartungstreu“, was bedeutet, dass sie sich mit Erhöhung des Stichprobenumfangs n immer weiter dem wahren Wert annähern. Ihr Erwartungswert gleicht also dem wahren Wert. [8, p. 76]

Da die Mittelwerte \bar{y} dem Zufall unterliegen, besitzen auch diese eine Verteilung und somit eine Streuung welche mit der Varianz eines Mittelwertes

$$\sigma_{\bar{y}}^2 = \frac{\sigma^2}{n}, \quad (3.3)$$

als Varianz der Einzelwerte gebrochen durch den Stichprobenumfang, ausgedrückt wird. Mit der allgemeinen Definition für die Standardabweichung ($s = \sqrt{\text{Var}}$) lässt sich daraus der Schätzer für die Standardabweichung eines Mittelwertes

$$s_{\bar{y}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.4)$$

ableiten. [8, p. 78]

3.2.1 Vertrauensbereiche

Mit Hilfe der t-Verteilung oder Student-Verteilung (für t-Werte siehe Anhang) können Vertrauensbereiche für den Mittelwert festgelegt werden. In Abhängigkeit der t-Werte kann gesagt werden, dass der wahre Mittelwert μ mit einer Wahrscheinlichkeit von 95%, 99% oder 99,9% im Bereich

$$\bar{y} - t \cdot s_{\bar{y}} \leq \mu \leq \bar{y} + t \cdot s_{\bar{y}} \quad (3.5)$$

zu finden ist. Man nennt diesen Bereich zweiseitigen Vertrauensbereich. Je größer der Versuchsumfang, desto geringer ist die Streuung von s . Von n Werten in der Stichprobe bleiben nach der Berechnung des Mittelwertes nur $n - 1$ Werte zur Bestimmung von s . Dieser Wert wird als Freiheitsgrad d_f (in Tabelle im Anhang als f) bezeichnet. Umso höher

der Freiheitsgrad, desto kleiner und genauer werden die Vertrauensbereiche. Für eine detailliertere Beschreibung dieser Zusammenhänge wird auf einschlägige statistische Literatur verwiesen. [8, p. 78f]

3.2.2 Signifikanz

Aufbauend auf die bekannten Grundlagen können die in Abschnitt 3.3.5 erklärten Effekte statistisch bewertet werden. Ein Effekt e beschreibt die Differenz zweier Mittelwerte \bar{y}_1 und \bar{y}_2 , also

$$\bar{e} = \bar{y}_2 - \bar{y}_1. \quad (3.6)$$

Diese entstammen zweier Stichproben mit jeweils n Werten und den beiden Varianzen s_1^2 und s_2^2 . Der gesamte Versuchsumfang N errechnet sich damit zu $N = 2 \cdot n$. Aus Gleichung (3.4) folgt für die Standardabweichung des Effekts

$$s_{\bar{a}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{2} = \sqrt{\frac{4}{N} \cdot s^2}. \quad (3.7)$$

Der Faktor $\sqrt{2}$ rührt daher, dass die Varianz einer Differenz zweier Mittelwerte doppelt so groß ist wie die Varianz eines Mittelwerts [8, p. 83]. Die Größe s^2 beschreibt den Mittelwert der Einzelvarianzen

$$s^2 = \frac{s_1^2 + s_2^2}{2}. \quad (3.8)$$

Folglich kann durch Einsetzen von Gleichung (3.7) in Gleichung (3.5) das 95%, 99% und 99,9% Vertrauensniveau $t \cdot s_{\bar{a}}$ berechnet werden ($d_f = 2 \cdot (n - 1)$). Ein Effekt gilt als statistisch signifikant wenn

$$|\bar{e}| \geq t \cdot s_{\bar{a}}. \quad (3.9)$$

Das bedeutet, dass der Effekt mit der jeweiligen Wahrscheinlichkeit nicht zufällig auftritt. [8, p. 83ff]

3.3 Grundbegriffe der Versuchsplanung

Eine große Stärke der statistischen Versuchsplanung ist die vereinheitlichte Darstellung von Ergebnissen, die eine einfache Kommunikation mit Anwendern und Nichtanwendern ermöglicht. Es haben sich Begriffe geformt, die allgemein verstanden werden. Zu den wichtigsten zählen:

- Systeme
- Zielgrößen
- Parameter und Faktoren
- Stufen
- Effekte
- Wechselwirkungen

Im Folgenden wird auf diese Begriffe genauer eingegangen, um für einheitliches Wissen und Verständnis zu sorgen. [8, p. 12] [18, p. 2]

3.3.1 Systeme

Ein System ist ein eindeutig abgesteckter zu untersuchender Bereich (siehe Abbildung 3-1). Die Begrenzung wird als Systemgrenze bezeichnet. Über diese wirken Einflussfaktoren oder -größen die entweder innerhalb oder außerhalb derer liegen und Ausgangsfaktoren (Zielgrößen) welche gemessen und als Ergebnisse bezeichnet werden können. Dient ein Design of Experiments beispielweise zur Findung einer effizienten Einstellung eines Systems oder zu dessen Erreichung, so muss man Kenntnis darüber haben, welche Einflussfaktoren dies beeinflussen. Nur jene Faktoren können gezielt verändert werden. Die Wirkung von Einflussfaktoren, die nicht zum System gehören, können zwar beobachtet, jedoch nicht reguliert werden. [18, p. 3f]

Man stelle sich vor das System heißt Auto und die einzustellende Systemgröße, das Ergebnis, wäre die Innenraumtemperatur. Die Außentemperatur und die Luftfeuchtigkeit würden Einflussgrößen darstellen, die nicht zum System gehören, jedoch eindeutigen Einfluss auf die Systemgröße haben. Hingegen wären die Zulufttemperatur und die Drehzahl des Lüftergebläses Einflussfaktoren, die gezielt reguliert werden können.

Die eindeutige und vollständige Definition des Systems ist essentiell für einen zufriedenstellenden Erkenntnisgewinn. Wird dieser Schritt sorgfältig durchgeführt, können einfache Designs aussagekräftige Ergebnisse liefern. [18, p. 4f]

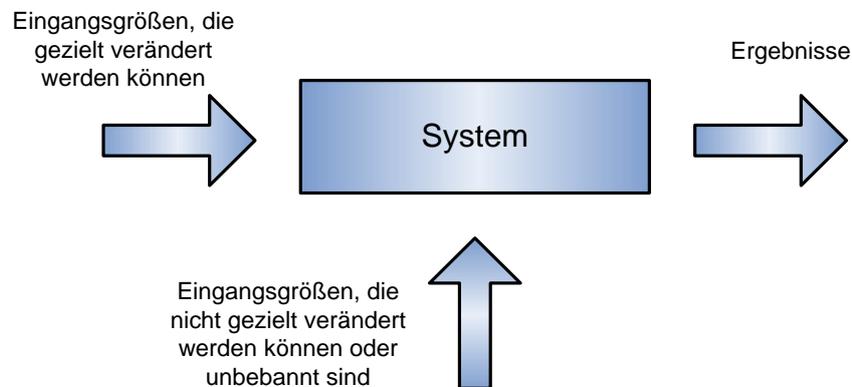


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des untersuchten Systems

3.3.2 Zielgrößen

Wie unter Abschnitt 3.3.1 erwähnt sind Zielgrößen die Ausgangsgrößen eines Systems. Es kann eine oder mehrere Zielgrößen geben welche von den Einflussgrößen beeinflusst werden. Ziel ist es, den Zusammenhang beider zu quantifizieren.

Es gibt qualitative Zielgrößen (z.B.: gut/schlecht) und quantitative Zielgrößen (z.B.: Messwerte). Es ist ebenfalls möglich, dass eine Zielgröße aus einem oder mehreren Messwerten berechnet wird (z.B.: Wirkungsgrad), da sie nicht direkt gemessen werden kann. [8, p. 12]

3.3.3 Parameter und Faktoren

Alle auf ein System wirkenden Einflussgrößen nennt man zusammengefasst Parameter. Es ist von Anfang an sinnvoll und vorteilhaft, eine vollständige Parameterliste zu erstellen, auch wenn der durchführbare Versuchsaufwand grundsätzlich begrenzt ist. Weiterführende Untersuchungen führen zu einer Selektion, was bedeutet, dass unerkannte Einflussgrößen unerkannt bleiben wenn sie nicht von Beginn an betrachtet werden. [8, p. 24] [18, p. 5]

All jene Parameter, die im Versuchsplan aufgenommen werden, heißen Faktoren. Die Auswahl hängt vom jeweiligen Anwendungsfall ab und sollte sorgfältig bedacht werden. Parameter, bei denen der Einfluss auf die Zielgröße(n) von vornherein bekannt ist, sollten prinzipiell ausgewählt werden. Wenn Unsicherheit herrscht, ob ein Parameter einen Einfluss

hat oder nicht, sollte im Zweifelsfall eine größere Menge an Faktoren aufgenommen werden. Die Voraussetzung ist, dass der entstehende Aufwand nicht den Rahmen sprengt. [8, p. 24] [18, p. 5]

Durch die oben beschriebene Auswahl ergeben sich grundsätzlich, nach G. Taguchi (siehe [7]), (siehe Abbildung 3-2) in der statistischen Versuchsplanung zwei Gruppen von Faktoren [8, p. 13].

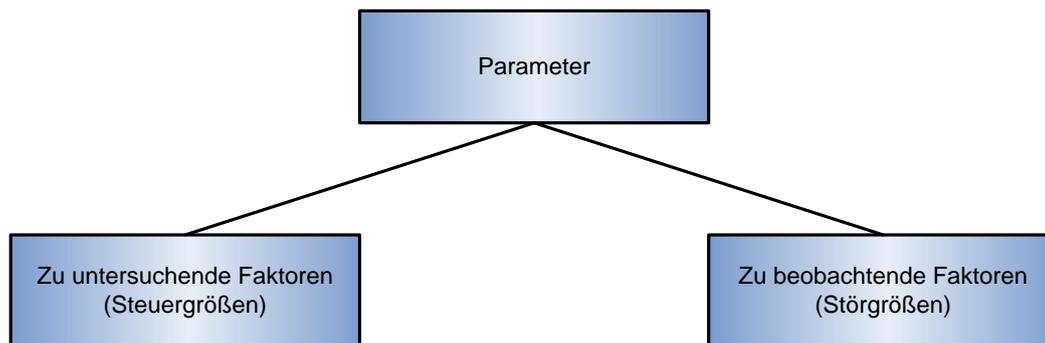


Abbildung 3-2: Einteilung der Parameter lt. G. Taguchi

Zu beobachtende Faktoren beinhalten alle Parameter, die nicht für den Versuch ausgewählt wurden. Oft ist es nicht möglich (oder erwünscht), Störgrößen auf einen bestimmten Wert einzustellen (z.B.: Umwelteinflüsse). Um Auswirkungen dieser Faktoren zu vermeiden, sollten sie möglichst konstant gehalten und / oder beobachtet werden. [8, p. 13] [13, p. 222f] [18, p. 5]

Bei den zu untersuchenden Faktoren muss es möglich sein, diese gezielt und reproduzierbar auf einen bestimmten Wert einzustellen. Weiters ist darauf zu achten, dass sich bei der Einstellung der Faktoren keine Kombinationen ergeben, die nicht realisierbar sind. Beispielsweise könnte es möglich sein, zwei Faktoren einzeln auf ihr Maximum zu verstellen, wobei nicht beide gleichzeitig ihr Maximum erreichen können. Solche Informationen müssen im Vorfeld bekannt sein und berücksichtigt werden. [8, p. 13] [18, p. 5]

Der Versuchsaufwand wird maßgeblich von der Anzahl der Faktoren bestimmt (siehe Abschnitt 3.4.5). Er steigt exponentiell mit jedem zusätzlichen Faktor. Eine gute Auswahl der Faktoren ist erfolgsentscheidend. Aus diesem Grund ist eine sorgfältige Vorarbeit bei der statistischen Versuchsplanung erforderlich. [18, p. 6]

3.3.4 Stufen

Als Stufen oder Levels werden die Einstellungsmöglichkeiten, das sind festgelegte Zustände (quantitativ) oder Sachverhalte (qualitativ), der Faktoren bezeichnet. Jeder Faktor muss auf mindestens zwei Stufen getestet werden. Die Abstände der Stufen haben großen Einfluss auf die Auswirkung der einzelnen Faktoren auf die Zielgröße. Diese Auswirkungen werden als Effekte bezeichnet. Handelt es sich um qualitative (=kategorische) Faktoren, hat man keine Möglichkeit den Abstand zu variieren. Die Stufen werden als Namen oder Bezeichnungen dargestellt. Für quantitative (=numerische) Faktoren gilt: Je größer der Stufenabstand, desto besser. Da es bei quantitativen Faktoren prinzipiell auch Zwischenwerte gibt, ist es sinnvoll eine Interpolation von Ergebnissen zuzulassen. Es gehört zu den vorbereitenden Aufgaben die Stufenabstände aufeinander abzustimmen. Je geringer die Stufenabstände, desto geringer sind die resultierenden Effekte und desto schwieriger ist das Detektieren der Effekte. Dieser Zusammenhang ist physikalisch begründet, denn sehr kleine Effekte können von einer zufällig auftretenden Teststreuung nicht unterschieden werden. Auch eine Extrapolation (außerhalb des Systems) solcher Effekte ist grundsätzlich nicht zulässig, da sich das Verhalten außerhalb des Untersuchungsbereichs sprunghaft ändern kann. [18, p. 6]

Für Voruntersuchungen und Untersuchungen von Effekten über die vorab wenig bekannt ist, ist es im Rahmen des Anwendungsfalles ratsam große Stufenabstände zu wählen, um die einflussreichsten Faktoren leichter aufzeigen zu können. In Folgeversuchen kann anschließend eine genauere Betrachtung der relevanten Effekte erfolgen. Wie unter Abschnitt 3.3.3 erwähnt muss sichergestellt sein, dass die geforderte Kombination von Einstellungen umsetzbar ist und das System funktionstüchtig bleibt. Im Zweifelsfalle sollten Vorversuche angestellt werden, um die Funktion von geplanten Einstellungen zu überprüfen. [18, p. 6]

Faktorstufen von 2-stufigen Versuchsplänen werden häufig mit $-/+$, $-1/1$ oder $1/2$ dargestellt (siehe Abbildung 3-3). In weiterer Folge wird zum einfacheren Verständnis nur die Notation $-/+$ zum Einsatz kommen. [18, p. 6]

3.3.5 Effekte

Wie unter Abschnitt 3.3.4 erwähnt, beschreibt ein Effekt die Auswirkung genau eines Faktors auf eine Zielgröße. Dies wird als Haupteffekt bezeichnet. Mathematisch betrachtet ist ein Effekt die Differenz des Mittelwertes der Zielgröße bei der Faktoreinstellung – und des Mittelwertes der Zielgröße bei der Faktoreinstellung +. [18, p. 12]

Abbildung 3-3 zeigt schematisch den linearen Effekt eines Faktors A auf eine beliebige Zielgröße. Je steiler der Anstieg der Geraden, desto stärker der Effekt. Wenn Faktoren nur in zwei Stufen verstellt werden, können ausschließlich lineare Effekte abgeleitet werden. Um festzustellen ob Effekte vorhanden sind, ist eine lineare Betrachtung ausreichend. Will man genaue Vorhersagemodelle für eine Zielgröße bestimmen, ist es notwendig, mehrere Stufen einzuführen um die eventuell vorhandene Nichtlinearität zu ermitteln.

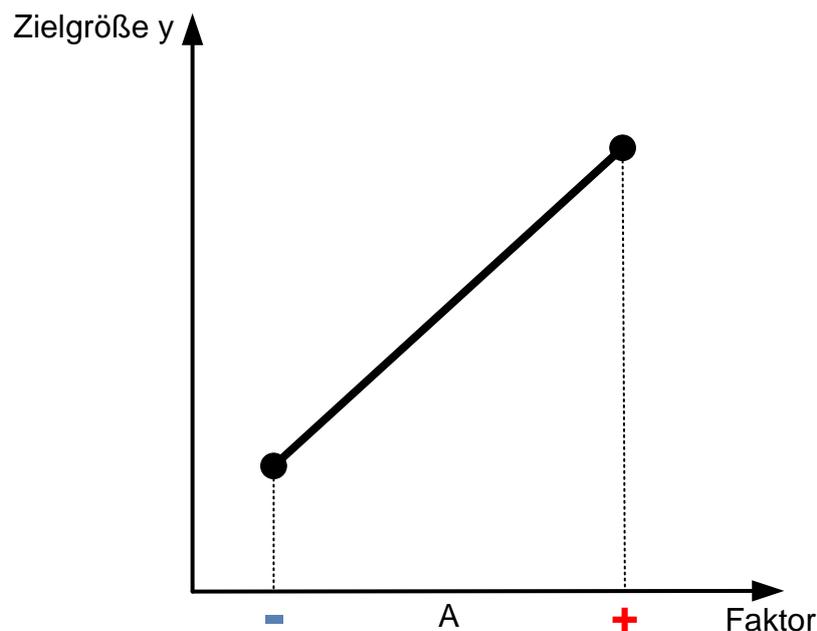


Abbildung 3-3: Effekte des Faktors A auf eine Zielgröße

3.3.6 Wechselwirkungen

Ein Grundsatz der Schulphysik besagt, dass eine eindeutige Zuordnung der Effekte zu den jeweiligen Faktoren nur möglich ist, wenn eine Einflussgröße verändert und alle anderen konstant gehalten werden. Diese Methode wird als „One factor at a time“ Methode bezeichnet. Dieser Ansatz ist richtig, er hat jedoch einen entscheidenden Nachteil, wodurch häufig Fehlinterpretationen entstehen. [18, p. 7]

Betrachtet man den Faktorraum, den mehrdimensionalen Raum, der den Einstellbereich der Faktoren abbildet, wird bei dieser Methode grundsätzlich als Ausgangspunkt einer der Eckpunkte gewählt. Alle Veränderungen der Faktoren sind auf diesen Punkt bezogen. Wie das System bei der Wahl eines anderen Ausgangspunktes reagiert wird nicht berücksichtigt. Diese Methode setzt voraus, dass die Effekte der einzelnen Faktoren unabhängig von der Einstellung der anderen Faktoren sind. In der Realität ist das aufgrund der Wechselwirkungen anderes. Die Wirkung eines Faktors hängt von der Einstellung eines anderen oder mehrere anderer Faktoren ab. [18, p. 7ff]

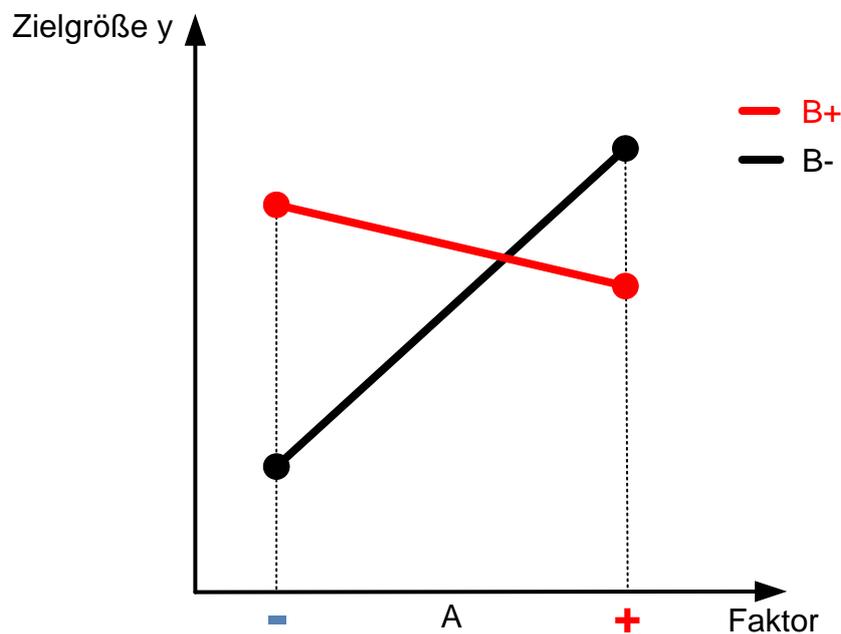


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung der Zweifachwechselwirkung zwischen den Faktoren A und B

Abbildung 3-4 zeigt schematisch eine Wechselwirkung zwischen den Faktoren A und B. Abhängig davon ob der Faktor B den Wert – oder + annimmt, ergeben sich unterschiedliche Effekte für den Faktor A auf die Zielgröße. Dies zeigt sich in der Abweichung der Parallelität der beiden Geraden. Man sagt die Faktoren A und B stehen in einer Zweifachwechselwirkung (2FWW). Es gibt auch höherwertige Wechselwirkungen (3FWW, 4FWW, usw.), jedoch sind Wechselwirkungen in einer höheren Ordnung als zwei selten von Relevanz und können häufig vernachlässigt werden. [8, p. 117ff]

Die statistische Versuchsplanung hingegen verfolgt eine Strategie, bei der trotz gleichzeitiger Variation mehrerer Faktoren, eine eindeutige Zuordnung der Effekte möglich ist. Der gegebene Faktorraum wird gleichmäßig untersucht. Dies ist die wesentliche Stärke der

Versuchsplanung. Ermöglicht wird dies durch die spezielle Konstruktion der Versuchspläne. Es sollen zwei mathematische Eigenschaften von Versuchsplänen bestmöglich erreicht werden: Orthogonalität und Ausgewogenheit.

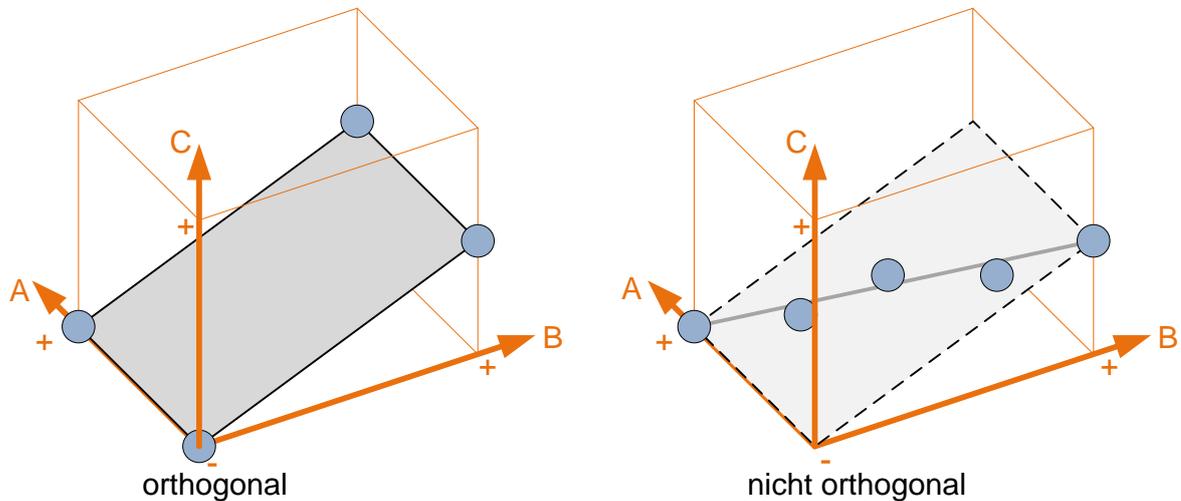


Abbildung 3-5: Symbolische Darstellung der Orthogonalität eines Versuchsplans

Orthogonal bedeutet, dass keine Kombination aus jeweils zwei Spalten miteinander korreliert, die Einstellmuster aller Faktoren sind voneinander unabhängig. Das bedeutet, dass jeder Faktor Werte annehmen kann, die die Einstellungen der anderen Faktoren nicht verändern. In Abbildung 3-5 ist der Unterschied schematisch dargestellt. Die linke Darstellung zeigt einen orthogonalen Versuchsplan. Wenn die Stufe von Faktor B verändert wird, bleibt der Wert von Faktor A konstant und umgekehrt. Im Gegensatz dazu verändert sich in der rechten Darstellung der Wert von A wenn sich der Wert von Faktor B ändert. Der Versuchsplan ist nicht orthogonal. [16, p. 1]

Bei orthogonalen Plänen sind die Schätzwert für die Koeffizienten im ermittelten Regressionsmodell voneinander unabhängig. Es ist ebenso möglich nicht orthogonale Versuchspläne auszuwerten. Es steigt damit die Breite der Vertrauensbereiche bei gleichbleibender Streuung der Zielgröße, was bedeutet, dass die Ergebnisse ungenauer werden. [8, p. 211] [16, p. 1]

Wenn sich für die Faktorlevels eines jeden Faktors die Stufen der anderen gleichmäßig verteilen, spricht man von Ausgewogenheit. Keine der Kombinationen ist von größerer Bedeutung.

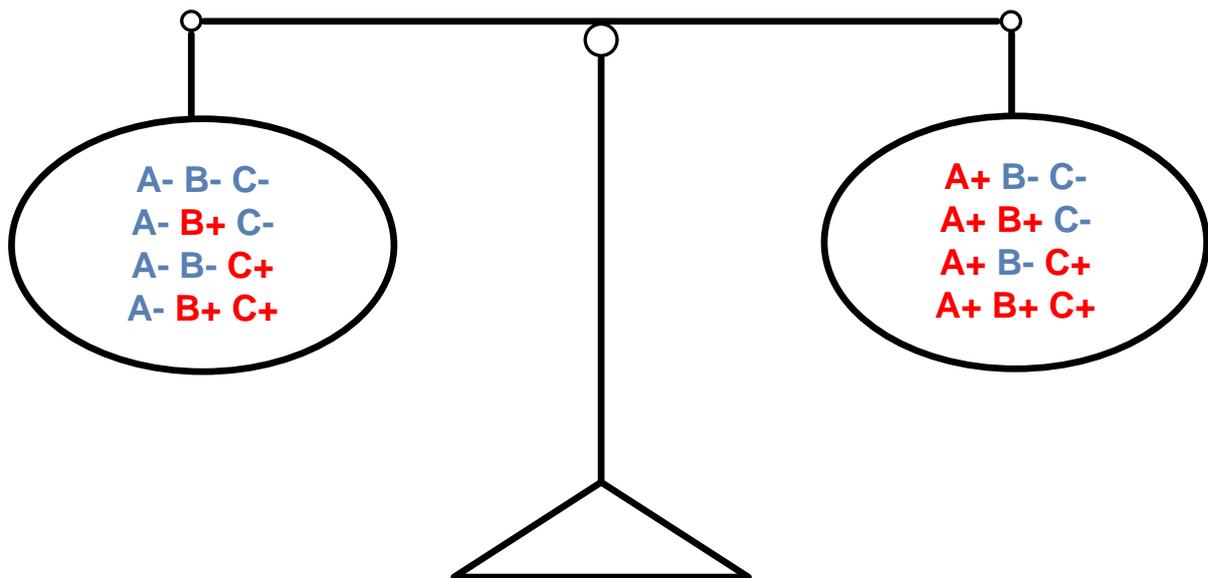


Abbildung 3-6: Symbolische Darstellung der Ausgewogenheit eines Versuchsplans

Wie in Abbildung 3-6 zu erkennen ist, sind die Versuche dieses Versuchsplans nach A- und A+ sortiert. Dieser Plan ist ausgewogen, da auf jeder Seite sowohl B- als auch B+ gleich häufig vorkommen. [8, p. 5] [18, p. 7]

Bei Standardversuchsplänen braucht man sich weder über Orthogonalität, noch über Ausgewogenheit Gedanken zu machen, da beide Bedingungen erfüllt sind. Kommen speziell angepasst Pläne zum Einsatz, müssen diese Eigenschaften berücksichtigt werden. Es ist nicht zwingend, dass ein Versuchsplan beide Eigenschaften vollständig erfüllt. Jedoch verliert man bei einer Nichterfüllung an Genauigkeit bei der Auswertung. Es wird schwieriger kleinere Effekte zu erkennen und der Vertrauensbereich vergrößert sich. [18, p. 7]

3.3.7 Ergebnis einer statistischen Versuchsplanung

Je nach Anwendungsfall hat ein Design of Experiments unterschiedliche Zielsetzungen. Im Rahmen dieser Arbeit kommen vor allem die klassischen Methoden der Versuchsplanung zum Einsatz. Ihre Aufgabe ist die quantitative Bestimmung und Optimierung einer oder mehrerer Zielgrößen. Abbildung 3-7 zeigt die zur Verfügung stehenden Designs. Eine weitere Gruppe von Methoden wird unter dem Begriff der G. Taguchi Methoden zusammengefasst. Sie beschäftigen sich mit dem Reduzieren der Streuung von Zielgrößen, der Robustheit von Systemen. Will man die wichtigsten Störgrößen, die auf ein System wirken, ermitteln und

den Einfluss dieser minimieren, bieten sich vor allem die Methoden von D. Shainin an. In der Literatur finden sich noch weitere speziellere Zielsetzungen von Versuchsplänen, auf die hier nicht weiter eingegangen wird. [8, p. 19ff]

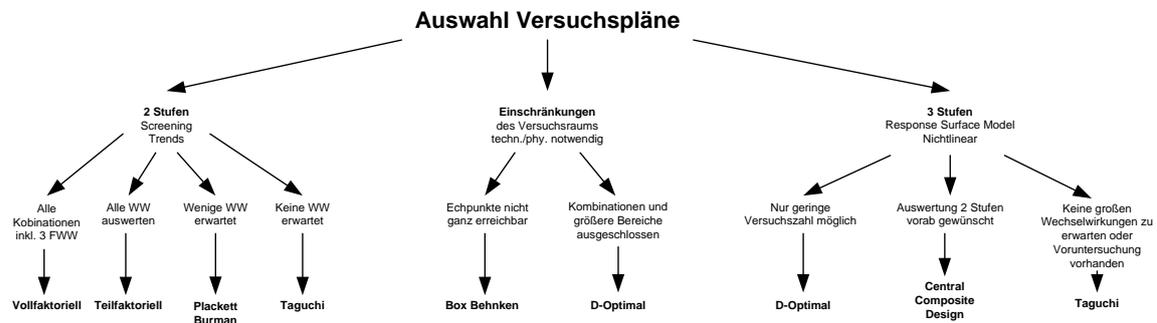


Abbildung 3-7: Auswahl klassischer Versuchspläne

Ausgehend von der unter Abschnitt 1.3 erklärten Zielsetzung sind für diese Arbeit die klassischen Methoden von Interesse. Im speziellen kommen zwei Verfahren zum Einsatz:

- Das Screening Verfahren
- Die empirische Modellierung

Als Screening bezeichnet man das Durchforsten (engl. to screen) von Faktoren. Ziel ist es daraus die einflussreichsten herauszufiltern und mögliche Wechselwirkungen zu detektieren. Grundsätzlich resultiert aus der Auswertung eines Screeningversuchsplans ein empirisch mathematisches Modell, das den Zusammenhang zwischen den Faktoren und der/den untersuchten Zielgröße(n) linear beschreibt. Dieses Modell beinhaltet alle Haupteffekte und Wechselwirkungen, die sich als statistisch signifikant herausgestellt haben. Statistisch signifikant bedeutet (vgl. Abschnitt 3.2.2), dass die Effekte oder Wechselwirkungen mit ausreichend großer Wahrscheinlichkeit nicht zufällig auftreten. [8, p. 6] [15]

Die empirische Modellierung ist auch als Antwortflächenmodellierung (engl. response surface modelling = RSM) bekannt. Sie wird zur genaueren Untersuchung von im Vorfeld als statistisch signifikant bestimmter Faktoren eingesetzt. Dabei werden die Zusammenhänge zwischen Faktoren und Zielgröße(n) meist mit Hilfe eines quadratischen Funktionsmodells möglichst optimal beschrieben. Dieses Modell ist grundsätzlich nur im untersuchten Bereich gültig und berücksichtigt die auftretende Zufallsstreuung mit Hilfe von Vertrauensbereichen (vgl. Abschnitt 3.2.1). Ziel ist es, ein möglichst genaues Vorhersagemodell für die Zielgröße(n) zu generieren. [8, p. 6] [15]

3.4 Vorgehensweise bei der Versuchsplanung

Aufbauend auf die bekannten Grundbegriffe, kann auf das prinzipielle Vorgehen bei der Methode der statistischen Versuchsplanung genauer eingegangen werden. Das Vorgehen ist ein Vorschlag und für den Erfolg einer Versuchsplanung keine Voraussetzung. Jedoch wird die Wahrscheinlichkeit zufriedenstellende Ergebnisse zu erreichen durch eine Schritt für Schritt-Abarbeitung, der in weiterer Folge beschriebenen Arbeitsschritte, wesentlich erhöht.

3.4.1 Beschreiben der Ausgangssituation

Das Beschreiben der Ausgangssituation gehört zu den vorbereitenden Tätigkeiten. Dabei wird festgelegt, welches Problem es zu lösen gilt. Es müssen Rahmenbedingungen für die Versuche geschaffen werden und es muss eine Strategie festgelegt werden, mit welchem Vorgehen man das Ergebnis erreichen will. Der mögliche Versuchsaufwand muss fixiert werden. Wie viel Kosten und Zeit eine Untersuchung benötigen darf, ist eines der wichtigsten Kriterien. Zu guter Letzt muss festgehalten werden, welche Informationen über das zu lösende Problem bereits bekannt sind. Auf Wissen aus vergangenen Problemen und bereits vorhandenes Know-how sollte unbedingt zurückgegriffen werden. [8, p. 17f] [9, p. 5]

3.4.2 Festlegung des Untersuchungsziels

Die Zielsetzungen, und in weiterer Folge die Zielgröße(n), werden festgelegt und beschrieben. Aus quantitativen Zielgrößen erhält man wesentlich mehr Informationen als aus kategorischen. Zusätzlich reduziert sich dadurch die Zufallsstreuung und in weiterer Folge die Größe des Versuchsumfangs. Auch über die Genauigkeit, mit welcher die Zielgröße ermittelt werden kann, muss eine Aussage getroffen werden, da sonst unter Umständen nur „große“ Effekte erkannt werden. Die Messstreuung muss relativ zur Größe der relevanten Änderung einer Zielgröße klein sein. Ist das nicht der Fall muss entweder die Messstreuung verringert (z.B. genauere Messmittel) oder die Messungen müssen mehrmals wiederholt werden, um einen Mittelwert der Messgröße zu erhalten und die Varianz zu verringern. Je nach Anwendungsfall muss auch festgelegt werden, welche Information man über die zu untersuchende Größe erhalten will. Abschnitt 3.3.7 beschreibt die daraus resultierende Auswahl der Designmethode. [8, p. 22f] [13, p. 222]

3.4.3 Sammeln der Parameter und Auswahl der Faktoren

Wie unter Abschnitt 3.3.3 erwähnt können Effekte die durch nicht berücksichtigte Parameter entstehen, nicht detektiert werden. Auch das konstante Halten von zu beobachteten Faktoren ist essentiell, da diese ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis haben können. Es ist vorteilhaft systematisch zu handeln. Das übliche Vorgehen sieht als ersten Schritt ein allgemeines Sammeln von möglichen Parametern. Es ist Expertenwissen gefragt. Eine beliebte Methode für diesen Vorgang ist das klassische Brainstorming. Je umfangreicher der Wissensinput, desto größer die Wahrscheinlichkeit keine entscheidende Einflussgröße zu übersehen. Aus diesem Grund empfiehlt es sich diesen Schritt in Teamarbeit durchzuführen. Weitere Methoden sind das Prozesslaufdiagramm, das Ursache-Wirkungs-Diagramm (Ishikawadiagramm) und die Einflussgrößen-Zielgrößen-Matrix. [8, p. 24] [9, p. 7]

Ist diese erste Phase der Parametersammlung abgeschlossen muss der Pool an gefundenen möglichen relevanten Einflussgrößen in zu beobachtende Faktoren und zu untersuchende Faktoren unterteilt werden (vgl. Abschnitt 3.3.3). Verfahren, die dazu konzipiert wurden, werden Homing-In Techniken genannt. Dabei sollte die Anzahl an Steuergrößen möglichst gering gehalten werden. Typischerweise werden drei bis sechs relevante Faktoren ausgewählt (selten mehr als zehn). Wie unter Abschnitt 3.3.3 beschrieben, werden Einflussgrößen mit vermutlich relevantem Effekt prinzipiell in den Versuchsplan aufgenommen. Weitere Kriterien zur Auswahl sind die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Einstellmöglichkeit bzw. der damit verbundene Aufwand. Darüber hinaus stellt die Forderung nach Orthogonalität (unabhängige Einstellbarkeit) ein Kriterium dar, das eingehalten werden sollte. Alle übrigen Parameter können weiter in beeinflussbare und nicht beeinflussbare Faktoren unterteilt werden. Erstere sollten möglichst konstant gehalten werden um keinen Einfluss auszuüben. Faktoren, die nicht beeinflusst werden können (z.B.: Umweltbedingungen), müssen auf jeden Fall beobachtet werden. Zusätzlich gibt es Methoden wie Randomisierung, Blockbildung oder Versuchswiederholungen um diese in die Auswertung der Versuchsplanung miteinzubeziehen. [8, p. 25f] [13, p. 222f] [15]

3.4.4 Festlegung der Faktorstufen

In Abhängigkeit der zuvor bestimmten Anzahl an Faktoren müssen für jeden dieser Stufen oder Levels bestimmt werden. Ab einer Anzahl von fünf oder sechs werden meist nur mehr zwei Stufen je Faktor untersucht, damit sich der Aufwand in Grenzen hält (siehe Abschnitt 3.4.5). Mit zweistufigen Plänen kann man herausfinden

- welche Faktoren einflussreich sind,
- wie groß die linearen Effekte auf die Zielgrößen sind,
- ob es signifikante lineare Wechselwirkungen gibt,
- was die vorteilhafteste Einstellung jedes Faktors in Bezug auf die Zielgröße ist.

Ist ein nichtlinearer Einfluss auf die Zielgröße nicht auszuschließen, kann zusätzlich zu einem zweistufigen Versuchsplan ein sogenannter Center Point eingeführt werden.

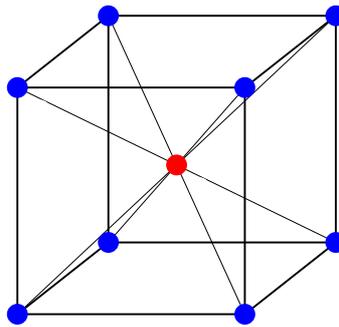


Abbildung 3-8: Versuchsplan mit 3 Faktoren auf 2 Stufen inkl. Center Point

Es wird jeder Faktor auf der Mittelstellung untersucht, wie in Abbildung 3-8 schematisch dargestellt. Stellt sich dieser Punkt als statistisch signifikant heraus (vgl. Abschnitt 3.2.2), hat mindestens einer der untersuchten Faktoren einen nichtlinearen Effekt. Bei einer geringeren Anzahl an Faktoren können mehr Stufen je Faktor untersucht werden. Daraus werden meist quadratische Modelle abgeleitet, welche es ermöglichen, Minima und Maxima von Zielgrößen im untersuchten Bereich zu bestimmen (vgl. Abschnitt 3.3.7). [4, p. 10] [8, p. 26]

Man unterscheidet grundsätzlich zwischen qualitativen und quantitativen Faktoren (vgl. Abschnitt 3.3.4). Quantitative Faktoren können auf beliebige Werte im Untersuchungsfeld eingestellt werden. Bei Screeningversuchen oder wenn bekannt ist, dass sich der jeweilige Faktor nur mit einem linearen Effekt auf die Zielgröße auswirkt, ist es ausreichend, nur zwei Stufen zu untersuchen. Die Werte für die Einstellungen sollten größtmöglichen Abstand

aufweisen, da damit der Versuchsaufwand verringert wird und Effekte leichter von der Zufallsstreuung unterschieden werden können. Ein zu groß gewählter Stufenabstand birgt jedoch ein Risiko. Bei Faktoren, welche sich nicht linear auf die Zielgröße auswirken, verfälscht ein zu großer Abstand bei 2-stufigen Versuchsplänen das Ergebnis. Abbildung 3-9 zeigt die Auswirkungen unterschiedlicher Stufenabstände auf die Erkennung der Effekte. [3, p. 9] [8, p. 27]

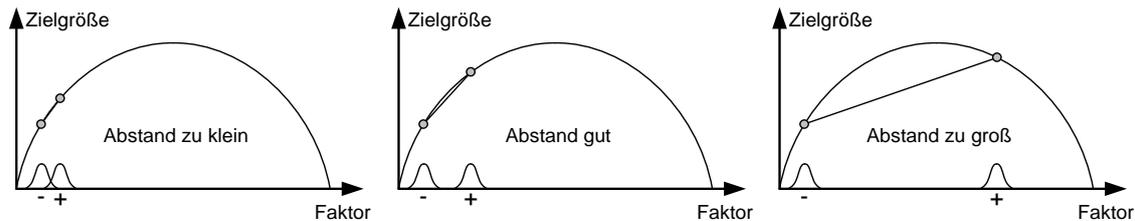


Abbildung 3-9: Auswirkungen des Stufenabstands auf die Effekterkennung

Qualitative (kategorische) Faktoren können ohnehin nur bestimmte Werte annehmen und sind damit stufenmäßig festgelegt. Bei mehr als zwei Einstellungen sollten für Screeningversuche nur die zwei wichtigsten ausgewählt werden. [8, p. 27]

3.4.5 Versuchsaufwand festlegen

Da die zu untersuchenden Faktoren und Stufen feststehen ist es an der Zeit, sich über den Versuchsaufwand Gedanken zu machen. Sowohl die Anzahl der Faktoren, als auch die Anzahl deren Levels sind treibende Größen für den benötigten Versuchsaufwand. Die Anzahl der Versuche n_r für vollfaktorielle Pläne ergibt sich allgemein als

$$n_r = n_l^{n_f} \quad (3.10)$$

wobei n_l die Anzahl der Stufen (Levels) und n_f die Anzahl der Faktoren beschreibt. Tabelle 3-1 zeigt als Beispiel einen Vollfaktorplan (siehe Abschnitt 3.5.1) mit drei Faktoren (A, B, C) auf zwei Stufen (-/+). Die Zielgröße beschreibt y . Für den Plan in Tabelle 3-1 ergeben sich also $n_r = 2^3 = 8$ Versuchsläufe. Würde man beispielsweise bei einem 2^3 Vollfaktorplan (siehe Tabelle 3-1) eine Stufe hinzufügen, müssten $n_r = 3^3 = 27$ Versuche durchgeführt werden um alle Kombinationen abzudecken. [18, p. 6f]

Tabelle 3-1: Vollfaktorieller Versuchsplan mit drei Faktoren auf zwei Stufen

Nr.	A	B	C	y
1	-	-	-	y1
2	+	-	-	y2
3	-	+	-	y3
4	+	+	-	y4
5	-	-	+	y5
6	+	-	+	y6
7	-	+	+	y7
8	+	+	+	y8

Daraus lässt sich ableiten, dass bei einer großen Anzahl zu untersuchender Faktoren der Aufwand für genauere Untersuchungen enorm wird. Aus diesem Grund werden Untersuchungen meist in zwei Phasen unterteilt. In der ersten Phase versucht man mittels Screening, mit so wenig Aufwand wie möglich, aus der großen Anzahl der Faktoren die relevanten herauszufiltern. Diese werden dann in der zweiten Phase, je nach Anwendungsfall, einer genaueren Untersuchung unterzogen. [18, p. 6f]

Eine weitere Triebfeder für den entstehenden Aufwand ist das Verhältnis von vorhandener zufälliger Teststreuung zu benötigter Ergebnisgenauigkeit. Je kleinere Effekte man erkennen möchte und je größer die Streuung der Messungen, desto mehr Versuche sind notwendig. Die benötigte Versuchsanzahl N berechnet sich näherungsweise mit

$$N \approx 60 \cdot \left(\frac{\sigma}{\Delta\mu} \right)^2. \quad (3.11)$$

Dabei wird die Zufallsstreuung durch die Standardabweichung σ und der technisch relevante Unterschied der Zielgröße durch $\Delta\mu$ repräsentiert. Diese Faustformel gilt für große N ($N > 60$). Für $N < 40$ sollten mehr Versuche durchgeführt werden. Für die Herleitung dieses Zusammenhangs wird auf [8, p. 89ff] verwiesen.

In der Versuchsplanung ist es üblich die gesamten Messungen eines Versuchs (mehrmals) zu wiederholen. Diese Wiederholungen werden als Realisierungen bezeichnet. Dadurch steigen die Versuchsanzahl N und die Genauigkeit der Untersuchung. Es ist allgemein bekannt, dass der Mittelwert von mehreren Messungswiederholungen einen genaueren Schätzwert für die gesuchte Größe darstellt. Beinhaltet ein Versuch m Messungen, so muss

er $n \approx \frac{N}{m}$ mal realisiert werden, um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen. Die Anzahl der Realisierungen wird durch n beschrieben. [8, p. 30] [18, p. 90]

Tabelle 3-2 zeigt den selben Versuchsplan wie Tabelle 3-1 mit einer zweiten Realisierung y_2 . Der Versuchsaufwand hat sich verdoppelt.

Tabelle 3-2: Versuchsplan mit zwei Realisierungen

Nr.	A	B	C	y1	y2
1	-	-	-	y1	y1
2	+	-	-	y2	y2
3	-	+	-	y3	y3
4	+	+	-	y4	y4
5	-	-	+	y5	y5
6	+	-	+	y6	y6
7	-	+	+	y7	y7
8	+	+	+	y8	y8

Ein weiterer Aspekt der mehrere Realisierungen mit sich bringen ist, dass erst damit eine Aussage über die vorhandene Streuung möglich ist. Bei Wiederholungsmessungen ist darauf zu achten, dass es sich um „echte“ Wiederholungen handelt. Ein zweites Durchführen einer Messung bei gleichbleibenden Einstellungen gibt zwar eine Aussage über die Streuung im System, jedoch nicht über die Streuung die durch ein erneutes Einstellen der Faktorstufen oder zum Beispiel das erneute Einspannen oder Erzeugen eines Prüflings entsteht. [18, p. 92]

3.4.6 Blockbildung

Eine weitere Möglichkeit ein technisch relevantes $\Delta\mu$ (siehe Abschnitt 3.4.5) aus dem Zufallsrauschen zu erkennen ist, das Rauschen und damit die Standardabweichung, zu verringern. Systematische Störgrößen welche vermutet werden oder bekannt sind, jedoch nicht beeinflusst werden können, können mit Hilfe von Blockbildung erfasst und eliminiert werden. Dabei werden Einzelversuche zu Blöcken zusammengefasst. Diese Blöcke sind meist ausgewogen und es wird versucht die Streuung innerhalb der Blöcke gering zu halten. Sollte zwischen den Blöcken ein Unterschied existieren, kann dieser quantifiziert und in weiterer Folge aus der Auswertung ausgeschlossen werden. [8, p. 31] [18, p. 93]

Werden beispielsweise Prüflinge aus verschiedenen Chargen verwendet, der mögliche Unterschied zwischen den Chargen jedoch für die Auswertung nicht von Interesse ist, ist es sinnvoll jede Charge als Block zu definieren. Die Charge wird dann als Blockfaktor bezeichnet. [18, p. 93]

Auch Realisierungen können als Blockfaktoren dienen. Tabelle 3-3 zeigt ein Design mit zwei Faktoren und zwei Wiederholungen. Jede Realisierung wird als Block angesehen. Ein möglicher Unterschied zwischen den Blöcken kann nachträglich erkannt und getrennt betrachtet werden. Für die genaue Vorgehensweise wird auf [8, p. 108ff] verwiesen.

Tabelle 3-3: Schematische Darstellung der Blockbildung

Nr.	Block	A	B	y
1	1	-	-	y1
2	1	+	-	y2
3	1	-	+	y3
4	1	+	+	y4
5	2	-	-	y5
6	2	+	-	y6
7	2	-	+	y7
8	2	+	+	y8

3.4.7 Randomisierung

Um wahre Effekte vom Rauschen zu unterscheiden gibt es noch eine weitere Möglichkeit – das Randomisieren (engl. random = zufällig). Dabei wird versucht einem auftretenden Trendverhalten (z.B.: Drift eines Messgerätes, steigende Umgebungstemperatur) während der Versuchsdurchführung entgegen zu wirken. Die Reihenfolge der Versuche soll ohne System zufällig durchgeführt werden. Das bedeutet nicht, dass die Messungen in beliebiger Reihenfolge durchgeführt werden dürfen, sondern, dass die Reihenfolge der Messungen per Zufallsgenerator bestimmt wird (siehe Tabelle 3-4).

Tabelle 3-4: Randomisierte Reihenfolge

Nr.	A	B	C	y
6	+	-	+	y6
1	-	-	-	y1
7	-	+	+	y7
3	-	+	-	y3
2	+	-	-	y2
5	-	-	+	y5
8	+	+	+	y8
4	+	+	-	y4

Dadurch werden Trendwirkungen dem Zufallsrauschen zugeschrieben. Abbildung 3-10 zeigt schematisch den Unterschied zwischen zufällig und systematisch durchgeführten Versuchen. Der Störgrößentrend (siehe Abbildung 3-10 unten) der systematischen Reihenfolge kann den Versuch durch Randomisierung nicht beeinflussen, da er auf die Versuche verteilt wird (siehe Abbildung 3-10 oben). Er wird der Versuchsstreuung, welche bekanntlich zufällig auftritt, zugeschrieben. [8, p. 31f] [18, p. 87ff]

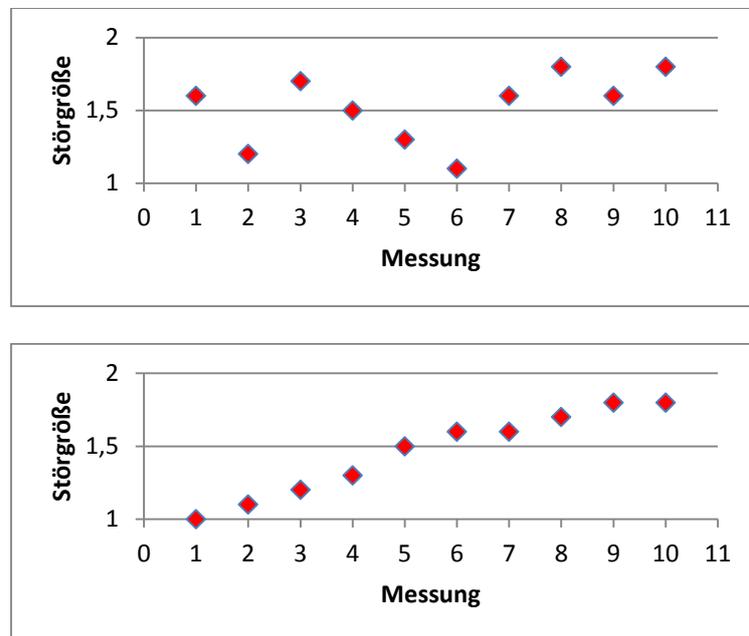


Abbildung 3-10: Effekt der Randomisierung

3.4.8 Aufstellen eines Versuchsplans

Abhängig vom festgelegten Untersuchungsziel (vgl. Abschnitt 3.4.1), muss der für den Anwendungsfall geeignetste Versuchsplan gewählt werden. Es gibt viele Standardversuchspläne auf welche man zurückgreifen kann. In speziellen Fällen ist es möglich selbst Pläne zu erstellen (z.B. D-Optimale Designs). Die auftretende Zufallsstreuung, die Anzahl der Faktoren und deren Stufen, sowie die gewünschte Genauigkeit des Ergebnisses spielen bei der Wahl des Versuchsplans eine wichtige Rolle. Der richtige Einsatz von Werkzeugen wie zusätzliche Realisierungen, Blockbildung und Randomisierung sind zentrale Kernpunkte einer guten Versuchsplanung. Der entstehende Versuchsaufwand und die entstehenden Kosten dürfen nie aus den Augen verloren werden. Eine sorgfältige Vorbereitung ist essentiell für ein erfolgreiches Ergebnis.

3.5 Die Screening Methode

Folgendes Kapitel beschreibt den Aufbau, die Anwendung und die Auswertung eines Screeningversuchsplans (vgl. Abschnitt 3.3.7). Für die Screening Methode eignen sich vor allem teilfaktorielle zweistufige Versuchspläne (siehe Abschnitt 5.6). Will man Detailuntersuchungen mit wenigen Faktoren durchführen, kommen auch häufig vollfaktorielle zweistufige Versuchspläne (siehe Abschnitt 3.5.2) zum Einsatz, welche den Zusammenhang zwischen Eingangsgrößen und Zielgröße(n) ausschließlich in einem linearen Beschreibungsmodell abbilden. Jedes Vorgehen hat Vor- und Nachteile und ist nicht für alle Anwendungsfälle geeignet. Im diesem Abschnitt wird hauptsächlich auf die Anwendung vollfaktorieller zweistufiger Versuchspläne eingegangen, da ein solcher Plan in weiterer Folge zur Anwendung kommt. Es würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen auf alle Methoden im Detail einzugehen. Für alternative Methoden wird auf einschlägige Literatur verwiesen. [18, p. 25]

3.5.1 Grundlagen zu vollfaktoriellen Versuchsplänen

Vollfaktorielle Versuchspläne stellen die einfachste Möglichkeit dar, einen Versuchsplan aufzubauen. Sie legen den Grundstein für viele Weiterentwicklungen. Vollfaktoriell bedeutet, dass alle möglichen Kombinationen getestet werden müssen. Damit geht einher, dass die Anzahl der Versuche mit steigender Faktor- oder Stufenanzahl rapide in die Höhe

wächst (vgl. Abschnitt 3.4.5). Aus diesem Grund werden sie fast ausschließlich für genauere Untersuchungen an wenigen zweistufigen Faktoren eingesetzt. Ist die Anzahl der Versuche keine limitierende Größe (z.B.: bei Simulationsergebnissen oder einfachen schnellen Versuchen), können Vollfaktorpläne auch für das Screening verwendet werden. Sie sind ausgewogen und orthogonal.

Die Anwendung von teilfaktoriellen Versuchsplänen bietet die Möglichkeiten den Versuchsaufwand stark zu verringern. Es kommt zu einer Überlagerung der beobachteten Effekte. Eine genaue Zuordnung ist nicht mehr möglich. Dadurch ergibt sich zwar ein Verlust an Aussagekraft, das ist aber in gewissen Anwendungsfällen vertretbar. Nähere Informationen zu teilfaktoriellen Versuchsplänen folgen in Abschnitt 5.6 bzw. wird dafür auf [8, p. 129ff] verwiesen. [18, p. 6f]

3.5.2 Aufbau eines vollfaktoriellen Versuchsplans

Wie oben erwähnt enthalten Vollfaktorpläne alle möglichen Faktorstufenkombinationen. Der einfachste Versuchsplan enthält zwei Faktoren auf je zwei Stufen (Abbildung 3-11). Der Einfachheit halber werden die Faktoren hier mit Großbuchstaben (A, B) und die Faktorstufen wiederum mit -/+ bezeichnet.

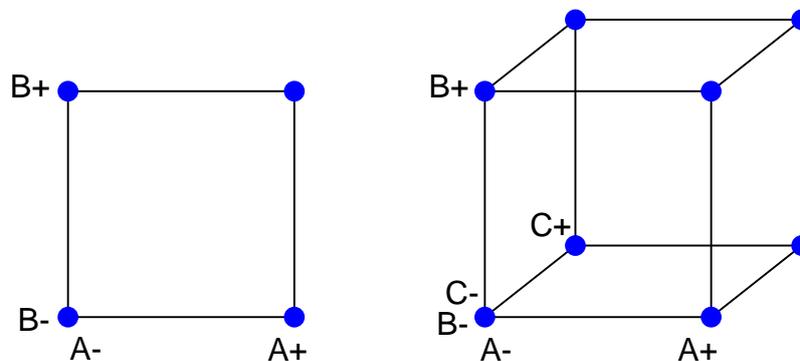


Abbildung 3-11: Vollfaktorieller 2² und 2³ Plan

Wird dieser Versuchsplan um einen zusätzlichen Faktor erweitert, verdoppelt sich die Anzahl der Faktorstufenkombinationen (vgl. Abschnitt 3.4.5). Wie in Abbildung 3-11 zu erkennen, lässt sich ein Versuchsplan mit drei Faktoren noch grafisch darstellen. Bei mehr als drei Faktoren ist das nicht mehr möglich. Jede Faktorstufenkombination eines zweistufigen Versuchsplans mit k Faktoren bildet den Eckpunkt eines k -dimensionalen Raumes. Die Pläne sind um beliebig viele Faktoren erweiterbar. [8, p. 113f]

3.5.3 Auswertung mittels Mittelwertvergleich

Um die Haupteffekte und Wechselwirkungen der Faktoren zu detektieren sind statistische Werkzeuge notwendig. Bei zweistufigen Plänen kommt häufig der hier gezeigte Mittelwertvergleich (oder Kontrastmethode) zur Anwendung. Er ist auf diese Anwendungen beschränkt. Für mehrstufige Faktoren und aufwendigere Versuchspläne ist es notwendig auf komplexere Methoden zurückzugreifen. Die bewährteste davon ist die Varianzanalyse oder ANOVA (engl.: **analysis of variance**) auf welche in Abschnitt 3.7 eingegangen wird.

Der Einfluss eines Parameters auf die untersuchte Zielgröße y wird als Effekt bezeichnet. Der Effekt ist die Differenz des Mittelwertes bei Einstellung $+$ und Einstellung $-$ des Faktors. Wie in Abbildung 3-3 zu erkennen, quantifiziert ein Effekt eine durch Stufenwechsel des Faktors ausgelöste Änderung der Zielgröße y . [18, p. 12]

Bezogen auf den oben gezeigten zweistufigen Versuchsplan mit zwei Faktoren berechnet sich der Effekt e_A für den Faktor A durch die Differenz der Mittelwerte als

$$e_A = \frac{y_2 + y_4}{2} - \frac{y_1 + y_3}{2} \quad (3.12)$$

und analog der Effekt e_B von Faktor B als

$$e_B = \frac{y_3 + y_4}{2} - \frac{y_1 + y_2}{2}. \quad (3.13)$$

Die Werte y_i beschreiben die einzelnen Zielgrößenmittelwerte der Versuche (siehe Tabelle 3-1). Ist dieser Effekt zusätzlich von der Einstellung eines anderen Faktors abhängig, wird er Wechselwirkung genannt (siehe Abbildung 3-4). Die Wechselwirkung AB sagt aus, wie sich der Einfluss von A verändert, wenn sich die Einstellung von B verändert. Wenn $y_4 - y_3$ der Effekt von A ist, wenn B auf $+$ steht und $y_2 - y_1$ den Effekt von A beschreibt, wenn B auf $-$ steht, berechnet sich die Wechselwirkung AB als

$$e_{AB} = \frac{y_4 - y_3}{2} - \frac{y_2 - y_1}{2}. \quad (3.14)$$

Aus diesem Versuchsplan können zwei Haupteffekte (A, B) und eine Wechselwirkung (AB) berechnet werden. Zusätzlich kann der Mittelwert aller Versuchsergebnisse bestimmt werden, welcher die allgemeine Lage der Ergebnisse widerspiegelt. Grafisch werden Effekte und Wechselwirkungen in Effekt-Diagrammen dargestellt. Dabei werden auf der Abszisse

die Faktoren in dimensionsloser Stufenkodierung dargestellt, was einen Direktvergleich der Effekte auf die auf der Ordinate aufgetragene Zielgröße zulässt (siehe Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4). [8, p. 102] [18, p. 13f]

In weiterer Folge gilt es diese Effekte zu beurteilen und zu bestimmen, welche dieser Effekte statistische Signifikanz aufweisen. Die Grundlagen dazu werden in Abschnitt 3.2 beschrieben. Das Screening hat zum Ziel, jene Effekte welche sich als signifikant herausstellen, in einem linearen mathematischen Beschreibungsmodell abzubilden. Es beschreibt den Zusammenhang der Faktoren und der Zielgröße. Die Anwendung des Mittelwertvergleichs wird in Abschnitt 5.5 näher veranschaulicht. [8, p. 83ff]

3.6 Das Response Surface Design

Wie in Abschnitt 3.3.7 erwähnt dienen Response Surface Designs dazu Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Zielgröße(n) detailliert zu untersuchen und anschließend in einem mathematischen Vorhersagemodell abzubilden. Sie unterscheiden sich zu den Screeningdesigns dadurch, dass die Faktoren oftmals mehr als zwei Stufen besitzen. Es wird eine Untersuchung auf quadratische Einflüsse möglich. Das Modell erweitert sich um die quadratischen Terme der Haupteffekte. [18, p. 37]

Tabelle 3-5: Vergleich lineares und quadratisches Modell

	2 Stufen		3 Stufen	
	Versuchszahl	Parameter lineares Modell	Versuchszahl	Parameter quadratisches Modell
2 Faktoren	4	4	9	6
3 Faktoren	8	7	27	10
4 Faktoren	16	11	81	15
5 Faktoren	32	16	243	21
6 Faktoren	64	22	729	28

Aufgrund der mehrstufigen Faktoren bringen diese Pläne, im Falle eines vollfaktoriellen Designs, einen großen Versuchsumfang mit sich. Im Sinne der Effizienz beschränkt sich ihr Einsatz in der Regel auf geringe Anzahlen an Faktoren. Im Vergleich zum linearen Modell wird die Zahl der Modellparameter nur gering erhöht. Jeder Parameter bringt lediglich einen

zusätzlichen (quadratischen) Term mit sich. Daraus lässt sich ableiten, dass eine Verringerung des Versuchsaufwandes mit keinem Informationsverlust behaftet ist. Es werden daher häufig teilfaktorielle Pläne eingesetzt. Tabelle 3-5 veranschaulicht diesen Sachverhalt. Sie zeigt die Auswirkungen durch das Hinzufügen einer dritten Faktorstufe. Drei Levels sind die Mindestanforderung um Nichtlinearitäten zu untersuchen. [18, p. 37]

3.6.1 Standardpläne

Für Response Surface Designs gelten ebenfalls dieselben beschriebenen Grundlagen. Es gibt auch hier unterschiedliche Verfahren mit Vor- und Nachteilen. Die bekanntesten Vertreter sind der zentral zusammengesetzte Versuchsplan (engl. Central Composite Design CCD), das Box Behnken Design und voll- bzw. teilfaktorielle Pläne mit 3 Stufen je Faktor. Diese sind Standardpläne und vollständig orthogonal. Orthogonale Designs liefern voneinander unabhängige Modellparameter und schmale Vertrauensbereiche. Aus diesem Grund sind sie, wenn möglich, zu bevorzugen. Die Auswertung erfolgt aufgrund der mehrstufigen Faktoren mittels Varianz- und Regressionsanalyse. Die erwähnten Verfahren werden hier nicht detailliert behandelt. Nähere Informationen finden sich in der Literatur. [8, p. 209ff] [18, p. 37ff]

3.6.2 Optimale Pläne

Standardpläne bringen auch Nachteile mit sich. Die Flexibilität leidet unter der fest vorgegebene Struktur. Es ist zwar möglich zu einem geringen Anteil vom idealen Plan abzuweichen, jedoch stößt man dabei schnell an Grenzen. Durch die Rechnerunterstützung haben sich in den letzten Jahrzehnten neue Ansätze entwickelt. Sie werden unter dem Begriff optimale Pläne zusammengefasst. Der Anwender hat dabei volle Flexibilität. Die Faktoren und ihre Levels sind frei bestimmbar. Eine Kombination von qualitativen und quantitativen Faktoren ist möglich. Weiters werden der Versuchsumfang und das gewünschte Modell vorgegeben. Aus diesen Angaben resultiert eine zunächst vollständige Kandidatenliste von möglichen Versuchseinstellungen, die in weiterer Folge eingeschränkt werden können. Spezielle, nicht durchführbare, Kombinationen sind entfernbar. Es werden Randbedingungen vorgegeben. [7, p. 154f] [8, p. 227f] [18, p. 52f]

Mit einem entsprechenden Algorithmus werden anschließend jene Kandidaten aus der Liste gewählt, deren Ergebnisse eine optimale Modellanpassung ermöglichen. Es existieren verschiedene Optimalitätskriterien. In der Vergangenheit hat sich vor allem das D-optimale Design durchgesetzt. Ausgehend vom linearen Regressionsmodell

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{c} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (3.15)$$

wobei \mathbf{y} die Zielgröße, \mathbf{X} die Koeffizienten, \mathbf{c} die Modellkonstanten und $\boldsymbol{\varepsilon}$ den Restfehler beschreiben, folgt durch Umstellen der Gleichung für \mathbf{c}

$$\mathbf{c} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{y}. \quad (3.16)$$

Für D-Optimale Pläne wird durch maximieren der Determinante der sogenannten Informationsmatrix $(\mathbf{X}'\mathbf{X})$ versucht, die Determinante von $(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}$ zu minimieren. Ziel ist es, das Volumen des gemeinsamen Vertrauensbereichs für die Regressionskoeffizienten zu minimieren. Um die bestmöglichen Faktoreinstellungen zu eruieren, erstellt der Algorithmus mögliche Pläne aus der Kandidatenliste und vergleicht die Determinanten der Informationsmatrizen miteinander. Für alternative Optimierungen wird hier auf die Literatur verwiesen. [7, p. 156ff] [8, p. 227f] [18, p. 53ff]

Die vorhandene Flexibilität bringt jedoch Gefahrenquellen mit sich. Die erzeugten Versuchspläne sind in der Regel nicht orthogonal, was bedeutet, dass die Modellparameter miteinander korrelieren und die Konfidenzintervalle vergrößert werden. Es ist essentiell sich im Vorfeld zu überlegen, welche Aussagekraft das Ergebnis liefern soll. In Abhängigkeit davon muss das Design mit entsprechenden Diagnoseverfahren bewertet werden. Dafür wird im Vergleich zu Standardplänen Detailwissen benötigt. Werden diese Punkte vernachlässigt, kann das Resultat zu falsch interpretierten Ergebnissen führen. Weiters wird der Plan auf das vorgegebene Modell abgestimmt. Man sollte daher im Vorhinein über das zu untersuchende System Kenntnis haben, denn nicht berücksichtigte Modellparameter können aus den Ergebnissen kaum erkannt werden. [8, p. 227f]

Optimale Pläne können für spezielle Anwendungsfälle dienlich sein. Ihre Anwendung bedarf jedoch zum einen spezielle Software und zum anderen ein gewisses Maß an Erfahrung mit Versuchsplanung. Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass mit der richtigen Vorbereitung ebenfalls gute Ergebnisse erzielt werden können.

3.7 Varianzanalyse (ANOVA)

Die Varianzanalyse ist eine weitverbreitete Methode im Bereich der Versuchsplanung und Teststatistik. Mit ihr wird es möglich, die Effekte von qualitativen und quantitativen Faktoren mit unterschiedlicher Stufenzahl zu untersuchen. Der in Abschnitt 3.5.3 erläuterte Mittelwertvergleich vergleicht die Größe der Effekte mit der Breite der Vertrauensbereiche, um die Signifikanz zu beurteilen. Die Grundidee der ANOVA ist eine andere. Sie vergleicht die Streuung oder Varianz, welche durch Faktoreffekte entsteht, mit der Versuchsstreuung. Die Literatur beschreibt dies als Vergleich der Variation zwischen den Gruppen mit der Variation innerhalb der Gruppen. Ganz allgemein gesagt, wird dabei die Testgröße F mit

$$F = \frac{\text{Streuung durch den Effekt}}{\text{Versuchsstreuung}} \quad (3.17)$$

berechnet und in weiterer Folge mit kritischen F -Werten verglichen. Diese stammen aus der sogenannten F -Verteilung. Sie sind von der Anzahl der Freiheitsgrade und dem geforderten Signifikanzniveau abhängig. Kommt man zum Ergebnis $F > F_{krit}$ gilt der Effekt als statistisch signifikant. [8, p. 235ff] [18, p. 105ff]

Die ANOVA setzt die Kenntnis der Versuchsstreuung voraus. Wenn diese nicht aus Vorversuchen bekannt ist, müssen zwingend Wiederholungen der Versuchspunkte durchgeführt werden. Ein häufiges Vorgehen ist das Wiederholen der Rand- und / oder (falls vorhanden) der Centerpunkte.

In Kapitel 6 wird die praktische Anwendung der Varianzanalyse veranschaulicht. Für eine nähere Erläuterung wird hier auf die Literatur verwiesen. [8, p. 235ff]

3.8 Regressionsanalyse

Als Regressionsanalyse beschreibt man eine Sammlung von Verfahren, welche mathematische Modelle an bestehende Daten anpassen. Diese Modelle versuchen den Zusammenhang zwischen Einflussgrößen und Zielgrößen bestmöglich abzubilden. Die Form des Zusammenhangs muss vorgegeben werden. Nachteil ist, dass in der Regressionsanalyse jedes beliebige Modell an bestehende Daten angepasst werden kann. Es gibt jedoch Gütekriterien, die eine Bewertung der Modellbeschreibung ermöglichen. [8, p. 183]

Im Allgemeinen sind alle Verfahren nach demselben Schema aufgebaut. Zu Beginn der Analyse steht die Datenaufbereitung. Die Daten werden auf Ausreißer und Plausibilität untersucht. Eventuell müssen sie transformiert werden, um ein eindeutigeres Ergebnis zu erhalten. Mögliche Transformierungen können [8, p. 95ff] entnommen werden.

Im nächsten Schritt folgt die eigentliche Modellanpassung. Es stehen mehrere Ansätze zur Auswahl. Ein häufig verwendetes Verfahren ist die Methode der kleinsten Quadrate (siehe [8, p. 184ff]). Ziel ist es die Parameter des vorgegebenen Modells so „einzustellen“, dass die bestmögliche Annäherung resultiert.

Jene Faktoren, welche keinen signifikanten Einfluss auf die Zielgröße aufweisen, können unberücksichtigt bleiben. Häufig werden mehrere mögliche Modelle erstellt. Das Bestimmtheitsmaß ist eine Kenngröße, welche einen Vergleich dieser ermöglicht.

Da der Zusammenhang zwischen Faktoren und Zielgröße vorgegeben werden muss, ist eine Nachuntersuchung unumgänglich. Diese Methoden werden unter dem Begriff Diagnoseverfahren zusammengefasst. Mit ihnen wird die Qualität der Anpassung validiert. Hierfür kommt beispielsweise die Residuenanalyse zum Einsatz.

In weiterer Folge kann das empirische Modell zur Prognose der Zielgröße eingesetzt werden. Die Unsicherheit der Vorhersage wird mithilfe von Konfidenzintervallen berücksichtigt. Es ist zu beachten, dass der ermittelte Zusammenhang nur innerhalb des untersuchten Bereichs Gültigkeit besitzt. Eine Extrapolation über den Rand hinaus ist zwar möglich und zulässig, jedoch liegen keine abgesicherten Ergebnisse vor.

Es gibt eine Vielzahl verschiedener Regressionsverfahren. Die Anwendung dieser Untersuchung beschränkt sich auf den Einsatz der linearen Regression. Dazu gehören die einfache und die multiple lineare Regression. Erstere beschreibt den Zusammenhang zwischen der Zielgröße und einer unabhängigen Variable x . Die Zielgröße y wird in einem Modell der Form

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (3.18)$$

abgebildet. Die Größen β_0 und β_1 werden dabei als Parameter und ε als Abweichung des Modells zum wahren Wert bezeichnet. Die multiple Regression bildet ein Modell aus mehreren unabhängigen Variablen. Beispielsweise könnte der Zusammenhang

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_2^2 + \varepsilon \quad (3.19)$$

lauten. Dabei wird x_1 linear und x_2 sowohl linear als auch quadratisch berücksichtigt. Da die Gleichung jedoch linear in den Parametern β_0 , β_1 , β_2 und β_3 ist, wird trotzdem von linearer Regression gesprochen.

Da diese Arbeit den Bereich der Versuchsplanung zum Fokus hat, wird auch im Fall der Regressionsanalyse auf die Literatur verwiesen. [2, p. 20ff] [8, p. 183ff] [12, p. 258ff] [18, p. 192ff]

4 Der Prüfaufbau

Um den Wirkungsgrad von Spindelsystemen messbar zu machen, wird eine Prüfeinrichtung entwickelt. Dabei kann auf ein bereits bestehendes Konzept aufgebaut werden. Die Idee für das in Abschnitt 4.1 beschriebene Messprinzip ist dadurch vorgegeben. Es ist jedoch weder möglich verschiedene Spindeltypen zu vermessen, noch die Hubgeschwindigkeiten zu verändern. Der vorhandene Prüfaufbau ist auf ein spezielles Spindelssystem abgestimmt, welches in einem Serienprodukt zum Einsatz kommt. Der Antrieb erfolgt über eine einfache Gleichstrommotor – Getriebeeinheit, welche ebenfalls aus demselben Produkt stammt. Weiters weisen die Messungen große Streuungen auf. Bei Axiallasten kommt es zu Verformungen der Spindel, was das Ergebnis stark beeinflusst. Aus diesem Grund wird der gesamte Aufbau überarbeitet. Abschnitt 4.2 beschreibt das finale Prüfkonzept im Detail.

4.1 Das Messprinzip

Wie Abschnitt 2.3 beschreibt, ist der Wirkungsgrad für das Senken eines selbsthemmenden Gewindes per Definition null. Eine messtechnische Ermittlung ist nicht zulässig. Da die zu untersuchenden Prüflinge selbsthemmend sein können, ist folglich nur eine Wirkungsgradmessung für den Hubvorgang sinnvoll. Ein Prinzipbild des Messaufbaus, sowie ein Freikörperbild des Prüflings zeigt Abbildung 4-1.

Mit Gleichung (2.11) und dem Antriebsmoment (Motormoment M_M)

$$M_M = F_U \cdot \frac{d_2}{2} \quad (4.1)$$

folgt für den Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{F_S \cdot P_h}{2 \cdot M_M \cdot \pi} \quad (4.2)$$

Durch Bestimmung der Hubkraft F_S und des Antriebsmomentes M_M , kann somit der Wirkungsgrad bestimmt werden.

4.2 Der Prüfstand

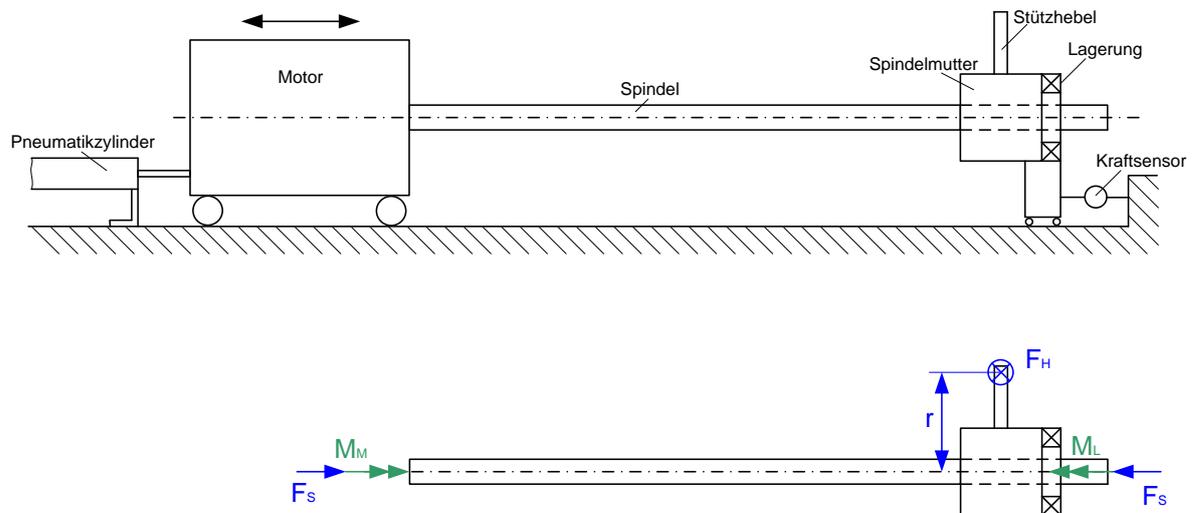


Abbildung 4-1: Modell des Prüfaufbaus und Freischnitt des Spindelsystems

Abbildung 4-1 (oben) zeigt das Modell des Prüfaufbaus. Die Spindel wird durch eine Servomotoreinheit direkt angetrieben. Es kann die Drehzahl und damit die Hubgeschwindigkeit stufenlos vorgegeben werden. Der Motor ist auf Rollenführungen montiert und somit in Achsrichtung frei beweglich.

Die dazugehörige Spindelmutter wird frei drehbar auf eine Lagereinheit aufgespannt, welche ebenfalls auf Rollenführungen befestigt ist. Eine Verdrehung der Spindelmutter verhindert ein Hebel (Hebellänge r), welcher durch einen Kraftaufnehmer gestützt wird. Folglich kann die Stützkraft F_H direkt gemessen werden. Aus dem in Abbildung 4-1 (unten) gezeigten Freikörperbild des Spindelsystems kann das Momentengleichgewicht aufgestellt werden. Daraus ergibt sich für das Motormoment

$$M_M = F_H \cdot r + M_L. \quad (4.3)$$

Unter der Annahme, dass das Lagerreibmoment M_L vernachlässigbar klein ist, folgt

$$M_M = F_H \cdot r. \quad (4.4)$$

Über einen Pneumatikzylinder kann die Motoreinheit axial belastet werden. Der Zylinder wird über ein elektromagnetisches Druckregelventil auf konstanten Druck geregelt. Die eingeleitete Kraft wird über die Spindel auf die Spindelmutter und Lagereinheit übertragen und anschließend über einen Kraftaufnehmer in Achsrichtung abgestützt, welcher

gleichzeitig die Belastung F_S misst. Mit Gleichung (4.2) kann der Wirkungsgrad somit direkt bestimmt werden. Ein installiertes Seilzugpotentiometer dient zur Überwachung der Hubs und der Hubgeschwindigkeit.

Für nicht selbsthemmende Spindeln kann durch Umstellen der Gleichung (2.14) auf

$$\rho' = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{\eta}\right) - \varphi \quad (4.5)$$

der Reibwinkel ρ' bestimmt und dadurch in weiter Folge mit Gleichung (2.16) der Wirkungsgrad für den Senkvorgang berechnet werden.

Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 zeigen den fertigen Prüfaufbau. Die Datenerfassung der Analogsensoren erfolgt mittels einem DEWE-43 Messverstärker und dem dazugehörigen Softwarepaket DEWESoft X2. Die verwendeten Messmittel sind zusammengefasst in Tabelle 4-1 dargestellt.

Tabelle 4-1: Verwendete Messmittel

Bezeichnung	Hersteller	Typ	Einsatz	Messbereich	Messfehler
615Steel	Tedea-Huntleigh	Zug- / Druckkraftsensor	Messung Axialkraft	+/-300kg	<0,02% FS
SML-220N	Interface	Zug- / Druckkraftsensor	Messung Stützkraft	+/-220N	<0,05% FS
S501P	Megatron	Seilzugpotentiometer	Messung Hub	0-1250mm	<0,25% FS
DEWE 43	DEWESoft	A/D-Wandler			

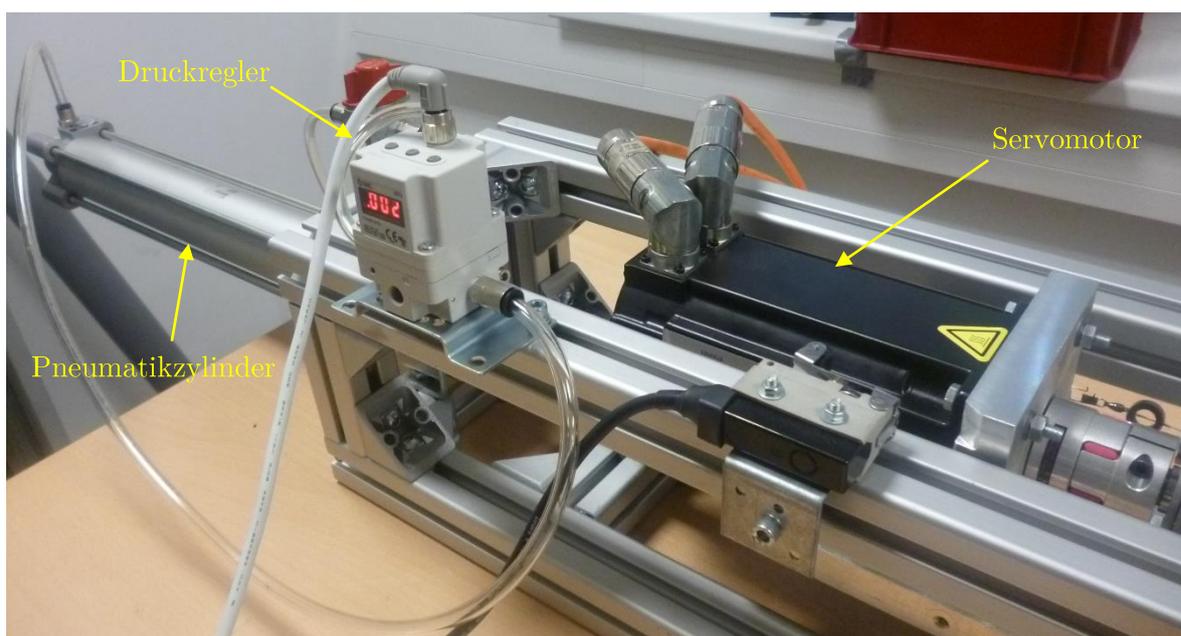


Abbildung 4-2: Prüfaufbau (Antriebseinheit)

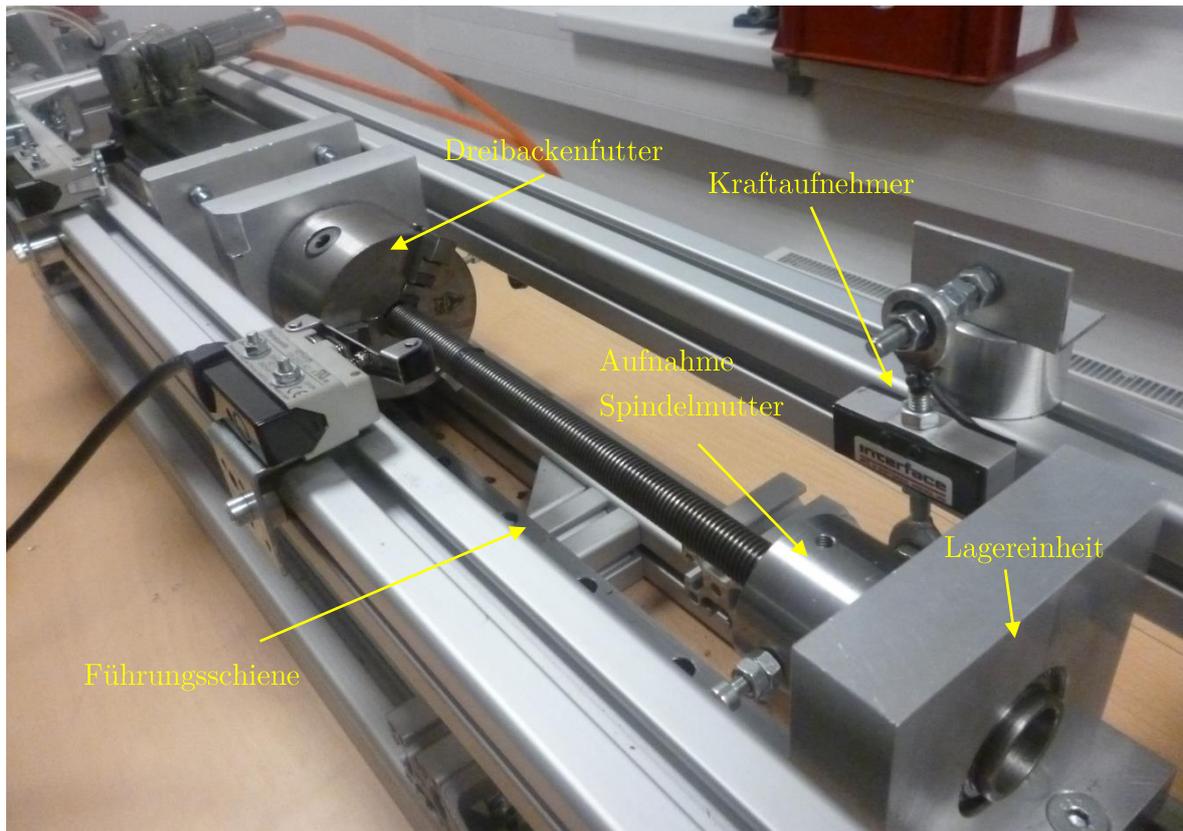


Abbildung 4-3: Prüfaufbau (Spindelaufnahme)

5 Der Screeningversuch

Aufbauend auf die beschriebenen Grundlagen wird das Verfahren der Versuchsplanung im folgenden Kapitel in die Praxis umgesetzt. Sukzessive wird, bezogen auf die gegebenen Randbedingungen, der Untersuchungsumfang abgegrenzt und ein Screeningversuchsplan aufgesetzt. Im nächsten Schritt folgen die Beschreibung der Messvorgänge und deren Auswertung. Nach der Evaluierung der Ergebnisse werden diese interpretiert, bewertet und in einem Beschreibungsmodell abgebildet. Den Abschluss des Kapitels bildet eine Vergleichsuntersuchung mithilfe eines alternativen Versuchsplans. Es werden Stärken und Schwächen der Verfahren aufgezeigt.

5.1 Vorgehensweise

Ziel eines Screenings ist es, die einflussreichsten Faktoren auf die gesuchte Zielgröße zu detektieren. Um ein zufriedenstellendes Ergebnis zu erzielen, ist eine systematische Vorgehensweise, wie sie unter Abschnitt 3.4 beschrieben wurde, wesentlich.

- Der erste Schritt ist die Analyse der Ausgangssituation und die Festlegung der Zielsetzung. Diese Phase bildet den Grundstein für alle weiteren Arbeitsschritte.
- In weitere Folge werden mögliche Parameter, die den Wirkungsgrad einer Stahlspindel-Kunststoffmutter Kombination beeinflussen können, erhoben. Um ein lückenloses Ergebnis zu erzielen, wird mit Hilfe von theoretischer und empirischer Unterstützung eine möglichst umfangreiche Parameterliste erstellt.
- Aus diesem Pool an Einflussfaktoren wird, begründet durch technische und wirtschaftliche Überlegungen, eine Faktorauswahl getroffen und der Versuchsraum festgelegt.
- Mit Hilfe von Vorversuchen kann die Messstreuung des Versuchsablaufs abgeschätzt und somit ein vernünftiger Versuchsaufwand fixiert werden. Nach Abschluss aller vorbereitenden Maßnahmen kann ein Versuchsplan aufgestellt werden. Als Design wird ein vollfaktorieller Versuchsplan gewählt.
- Abschließend gilt es die Versuchsergebnisse aufzubereiten, auszuwerten und zu interpretieren. Aus den Ergebnissen kann die weitere Vorgehensweise abgeleitet werden.

5.2 Ausgangssituation und Zielsetzung des Screenings

Ausgehend von Erfahrungen aus der Vergangenheit sind zwar Parameter bekannt mit welchen der Reibwert und somit der Wirkungsgrad eines Spindelsystems qualitativ beeinflusst werden kann, jedoch stellt man sich nie die Frage nach den genauen quantitativen Zusammenhängen. Bei bestehenden Problemen wird auf diese Erfahrungswerte zurückgegriffen und nach dem „trial and error“ Verfahren ein Parameter nach dem anderen verändert, bis sich das gewünschte Ergebnis einstellt. Was genau am System verändert wird, kann man nicht feststellen.

Vor einem unlösbaren Problem steht man wenn man Vorhersagen für den Wirkungsgrad treffen muss. Bei der theoretischen Auslegung von Antriebseinheiten in der Konzeptphase einer Produktentwicklung treten solche Fragestellungen zwingend auf. Da der Antrieb zu diesem Zeitpunkt physisch nicht existiert, ist ein „trial and error“ Verfahren ausgeschlossen. Qualitative Vorhersagen sind nicht ausreichend genau um optimierte Produkte zu entwickeln. Es ist notwendig die Auswirkungen der Parameter auf den Wirkungsgrad zu quantifizieren. In weiterer Folge soll daraus ein empirisches Wirkungsgradmodell abgeleitet werden, mit welchem es möglich ist, zukünftig brauchbare Prognosen für das Wirkungsgradverhalten von Spindelssystemen geben zu können. Dabei sollen die Erfahrungen der Vergangenheit mitberücksichtigt werden.

Im Screening sollen die grundlegenden Erkenntnisse geschaffen werden. Aufbauend auf dieses Wissen wird in einem zweiten Schritt eine Detailuntersuchung durchgeführt.

5.3 Bestimmen der Faktoren und Faktorstufen

Die Bestimmung der zu untersuchenden Faktoren wird als Schlüsselstelle in der Versuchsplanung bezeichnet. Aus diesem Grund wird nach dem Prinzip „Vom Groben zum Detail“ vorgegangen. Im Speziellen wird zu Beginn auf eine möglichst breite Sichtweise geachtet. Nach technischen und wirtschaftlichen Überlegungen kristallisieren sich am Ende sechs relevante Parameter heraus.

5.3.1 Identifikation der Einflussgrößen

Bei der Identifikation der Einflussgrößen wird damit begonnen, die vorhandenen Erkenntnisse zu nutzen. Es ist bekannt, dass das verwendete Fett in Kombination mit dem Werkstoff der Mutter einen großen Einfluss auf das Reibverhalten der Stahlspindel-Kunststoffmutter Kombination ausübt. Weiters gibt es Beobachtungen, dass im Dauerlauf betriebene und durch Reibungsarbeit erwärmte Spindeln eine spürbare Leichtgängigkeit aufwiesen. Auch beim Verschleiß der Spindelmuttern, der durch höhere Betriebszyklenzahl zwingend eintritt, wird ein Einflussverhalten vermutet.

Zum Sammeln von weiteren Parametern wird ein Brainstorming durchgeführt. Durch dieses Vorgehen erweitert sich der Pool an bekannten Einflussgrößen mit Hilfe von technischem Grundverständnis beträchtlich.

Vervollständigt werden die möglichen Einflussgrößen durch eine Literaturrecherche, da vor allem über das tribologische Verhalten von Kunststoffen kein fundiertes Wissen vorhanden ist. Aus [1, p. 157] geht hervor, dass auch die Stahlsorte und die Oberflächenrauheit der Spindel eine Rolle spielen können.

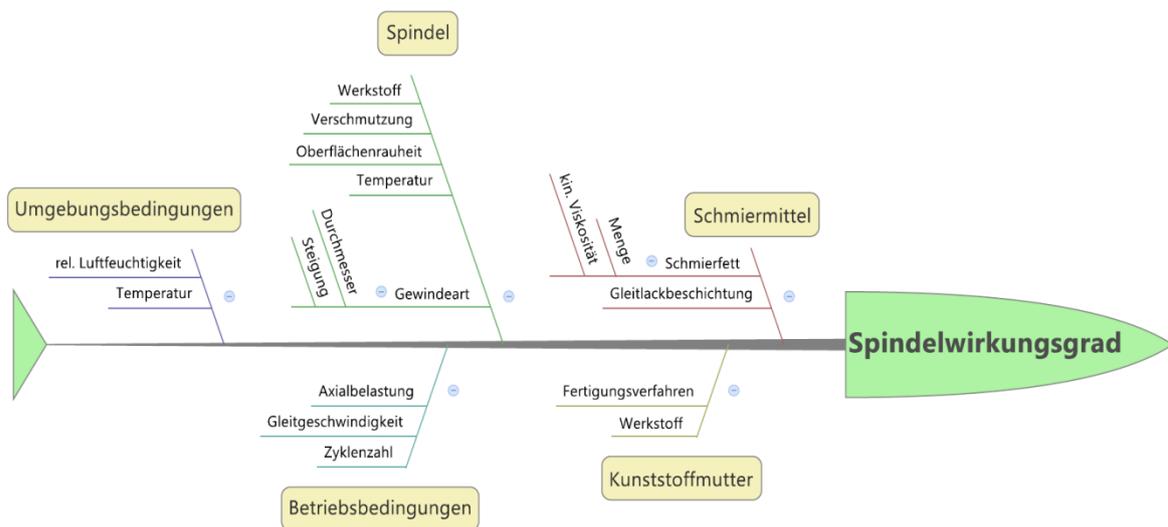


Abbildung 5-1: Ishikawadiagramm

Die gesammelten Daten werden in einem Ishikawadiagramm (oder auch Ursachen-Wirkungsdiagramm) anschaulich dargestellt (siehe Abbildung 5-1).

5.3.2 Bewertung der Faktoren

Die Auswahl, der in den Versuchsplan aufgenommenen Faktoren, geschieht nach verschiedenen Überlegungen. Hauptkriterium ist, dass der Versuchsraum die relevanten Anwendungen möglichst umfangreich abdeckt. Zum einen sollen die Faktoren beeinflussbar sein, um mögliche Stellschrauben für den Wirkungsgrad identifizieren zu können, zum anderen soll der Einfluss von nicht beeinflussbaren Faktoren ebenfalls untersucht werden. Im Speziellen jene Parameter, die sich während der Lebensdauern der Spindelsysteme stark verändern können. Die Aufnahme von qualitativen Faktoren soll vermieden werden, da die Aussagekraft der Ergebnisse dadurch begrenzt wird. Ein weiteres Kriterium ist der Aufwand, der bei Veränderung der Einstellstufe während des Versuchs entstehen würde, bzw. die Kosten welche anfallen würden, um den Faktor stufenweise einzustellen.

Tabelle 5-1: Bewertung der Faktoren

Gruppe	Parameter	Art	Beeinflussbarkeit	Einteilung
Spindel	Werkstoff	qualitativ	Steuergröße	
	Verschmutzung	qualitativ	Störgröße	
	Oberflächenrauheit	quantitativ	Steuergröße	
	Temperatur	quantitativ	Störgröße	untersuchen
	Gewindeart	qualitativ	Steuergröße	
	Durchmesser	quantitativ	Steuergröße	untersuchen
Schmiermittel	Steigung	quantitativ	Steuergröße	untersuchen
	Art	qualitativ	Steuergröße	
	Menge	quantitativ	Steuergröße	beobachten
Kunststoffmutter	kin. Viskosität	quantitativ	Steuergröße	untersuchen
	Werkstoff	qualitativ	Steuergröße	
Betriebsbedingungen	Fertigungsverfahren	qualitativ	Steuergröße	
	Axialbelastung	quantitativ	Störgröße	untersuchen
	Gleitgeschwindigkeit	quantitativ	Steuergröße	untersuchen
Umgebungsbedingungen	Zyklenzahl	quantitativ	Störgröße	
	rel. Luftfeuchtigkeit	quantitativ	Störgröße	beobachten
	Temperatur	quantitativ	Störgröße	beobachten

Um die Auswahl zu vereinfachen, werden die Parameter in Tabelle 5-1 zusammengefasst. Spindeldurchmesser, Spindelsteigung und Gleitgeschwindigkeit am Flankendurchmesser sind Parameter, welche von Spindelsystem zu Spindelsystem variieren. Ihr Einfluss auf die

Zielgröße ist somit von hoher Relevanz. Sowohl die Temperatur der Spindel als auch die Axialbelastung sind Größen, die zwar nicht direkt beeinflusst werden können, sich jedoch im Betrieb stark verändern. Der Temperatureinfluss ist außerdem schon aus vergangenen Versuchen bekannt. Aus diesem Grund werden auch diese beiden Faktoren untersucht. Etwas schwieriger ist die Entscheidung, wie der Einfluss des Schmiermittels untersucht werden soll. Auf die Untersuchung von Gleitlacken wird aufgrund von mangelnder Erfahrung verzichtet. Eine Aufnahme des Fetttyps als qualitativer Faktor wird ebenfalls abgelehnt. Zum einen ist die Auswahl an verschiedenen Schmierfetten nahezu unbegrenzt, zum anderen lässt ein qualitativer Faktor keine Interpolation zwischen den Stufen zu. Die Auswahl fällt daher auf die kinematische Viskosität. Sie ist die ausschlaggebende Größe für die Schmierfähigkeit eines Schmiermittels, was einen Vergleich verschiedener Schmierfette ermöglichen soll.

Weiters werden die Schmierfettmenge, die relative Luftfeuchtigkeit und die Umgebungstemperatur zu Faktoren erklärt, welche es zu beobachten gilt. Alle diese Faktoren unterliegen im Betrieb mehr oder weniger dem Zufall. Bei der Fettmenge wird wie in der Serienfertigung darauf geachtet, dass alle Prüflinge annähernd konstant gefettet werden. Temperatur und Luftfeuchte sind Bedingungen, die nicht direkt beeinflusst werden können. Darum wird auch bei der Versuchsdurchführung auf keine bestimmten Umgebungsbedingungen geachtet. Um jedoch Einflüsse durch starke Schwankungen zu detektieren, werden sie zumindest beobachtet. Alle zu beobachtenden Faktoren fließen somit in die Zufallsstreuung der Messungen ein.

Alle übrigen Parameter werden entweder als unkritisch eingestuft oder können aufgrund zu hoher Prüflingskosten nicht realisiert werden.

5.3.3 Faktorstufen

Für den Screeningversuch ist es ausreichend, die Faktoren auf zwei Stufen zu untersuchen. Damit besteht die Möglichkeit relevante Haupteffekte und Wechselwirkungen zu erkennen, was das Ziel dieser ersten Untersuchungsphase ist. Auf die Einführung eines Centerpunktes muss verzichtet werden, da nicht für alle Faktoren eine genaue Mittelstellung existiert. Folglich können mögliche quadratische Effekte vorerst nicht detektiert werden. Bei den sechs ausgewählten Faktoren handelt es sich ausschließlich um quantitative Faktoren. Es wird darauf geachtet, die Einstellstufen auf Extremwerte der Anwendung zu legen. Wie

unter Abschnitt 3.3.4 beschrieben, können reale Effekte so leichter erkannt werden. Tabelle 5-2 zeigt die Einstellstufen der sechs ausgewählten Faktoren.

Tabelle 5-2: Faktorstufen des Screeningversuchs

Name	Bezeichnung	Dimension	Low (-)	High (+)
Belastung	F	N	200	800
Gleitgeschwindigkeit	v	mm/s	25	400
Spindeldurchmesser	d	mm	10	16
Spindelsteigung	P_h	mm	2	8
Kinematische Viskosität	v	mm ² /s	150	730
Temperatur	T	°C	20	70

Axialbelastung

Speziell Linearantriebe für höhenverstellbare Bürotische sind häufig dafür ausgelegt, eine Masse von 80kg mit 40mm/s heben zu können. Somit werden auch die Spindelssysteme mit bis zu 80kg belastet. Aus diesem Grund wurde der obere Level, für den Versuch mit 800N festgelegt. Als untere Belastungsstufe wurden 200N gewählt. Zum einen sind die Antriebe im realen Betrieb nie unbelastet, da zumindest immer das Gewicht der Tischplatte oder des Aufbaus und die Reibung in den Führungen als Widerstand fungiert. Zum anderen können kleine Antriebsmomente, aufgrund der Messunsicherheit des Prüfstandes, nicht mit zufriedenstellender Genauigkeit bestimmt werden. Die axiale Belastung wird am Prüfstand, wie in Abschnitt 4.2 erläutert, mit Hilfe eines elektrisch geregelten Pneumatikzylinders simuliert.

Spindeldurchmesser und Spindelsteigung

Bei Nenndurchmesser und Steigung der Spindeln handelt es sich zwar prinzipiell um stufenlose quantitative Faktoren, jedoch ist die Herstellung von Spezialgewinden mit großen Werkzeugkosten verbunden. Dies würde den Rahmen dieser Untersuchung sprengen. Nach Recherchen und Anfragen bei diversen Herstellern können verschiedene Stahlspindel-Kunststoffmutterkombinationen im Durchmesserbereich von 10mm bis 20mm mit Steigungen von 2mm bis 10mm bezogen werden. Wie aus Tabelle 5-2 zu entnehmen ist, werden die Levels für den Screeningversuch etwas eingeschränkt. Grund dafür ist, dass in

diesem Bereich fast alle Kombinationen in 2mm Schritten vorhanden sind, was spätere Detailuntersuchungen vereinfacht.

Gleitgeschwindigkeit

Ein realistischer Parameter für die Anwendung ist die Hubgeschwindigkeit der Antriebe. Darum war grundsätzlich geplant, die Hubgeschwindigkeit als Parameter in den Versuchsplan aufzunehmen. Für ein tribologisches System ist jedoch die Gleitgeschwindigkeit im Reibkontakt von Bedeutung. Für Gewindetriebe kann die mittlere Gleitgeschwindigkeit v_{Gleit} auf der Gewindeflanke mit

$$v_{Gleit} = \frac{v_{Hub}}{P_h} \cdot d_2 \cdot \pi, \quad (5.1)$$

bedingt durch den geometrischen Zusammenhang als Funktion der Hubgeschwindigkeit v_{Hub} ausgedrückt werden. Daraus ist erkennbar, dass für gleiche Hubgeschwindigkeiten, in Abhängigkeit der Spindelgeometrie (Flankendurchmesser d_2 , Gewindesteigung P_h), unterschiedliche Gleitgeschwindigkeiten resultieren. Demzufolge wird die Gleitgeschwindigkeit am Flankendurchmesser als Faktor definiert. Eine Analyse der bestehenden Antriebskonzepte zeigt, dass Hubgeschwindigkeiten zwischen 2,5mm/s und 38mm/s von Relevanz sind. Daraus ergeben sich, in Abhängigkeit der jeweiligen Spindeldimensionen, Gleitgeschwindigkeiten im Bereich von 25mm/s und 400mm/s, welche somit als Stufeneinstellungen festgelegt werden. Daraus ergeben sich für jede Spindeldimension unterschiedliche Hubgeschwindigkeiten, welche am Prüfstand durch Drehzahlregelung eingestellt werden (siehe Tabelle 5-3).

Tabelle 5-3: Einstellstufen der Hubgeschwindigkeiten für die Versuchsdurchführung

Hubgeschwindigkeiten in mm/s	Gleitgeschwindigkeit	
	400 [mm/s]	25 [mm/s]
Spindel		
Tr 10x2	27,5	1,7
Tr 10x8	108,4	6,8
Tr 16x2	16,6	1,0
Tr 16x8	70,9	4,4

Kinematische Viskosität

Wie unter Abschnitt 5.3.2 erwähnt soll der Einfluss des Schmiermittels anhand der Variation der kinematischen Viskosität des im Schmierfett vorhandenen Grundöls untersucht werden. Nach Rücksprache mit einem Schmierstoffspezialisten der Fa. Klüber Lubrication Austria Ges.m.b.H wird eine geeignete Schmierfetttype gefunden. Die Produkte der Serie POLYUB GLY weisen annähernd die gleiche Rezeptur bei drei unterschiedlichen Viskositätsschichten ($150\text{mm}^2/\text{s}$, $500\text{mm}^2/\text{s}$ und $730\text{mm}^2/\text{s}$) auf. Für den Screeningversuch werden die beiden Extremschichten als High- und Low-Level ausgewählt.

Spindeltemperatur

Dass eine, durch Reibwärme begründete, Temperaturzunahme einen Einfluss auf die Leichtgängigkeit von Spindeln hat, ist schon aus vorherigen Versuchen und Tests bekannt. Um dieses Verhalten zu untersuchen, wird eine Hälfte der Prüflinge in einem Ofen auf 70°C erwärmt. Die zweite Hälfte wird bei Raumtemperatur gelagert. Durch eine Klimaanlage wird diese annähernd auf 20°C gehalten.

5.4 Der Versuchsplan

Da Screeningversuche hauptsächlich dazu dienen, relevante Haupteffekte aufzuzeigen, kommen häufig teilfaktorielle Pläne zum Einsatz. Der Grund ist die damit verbundene hohe Effizienz und Aufwandsersparnis.

Für die hier durchgeführte Untersuchung fällt die Entscheidung auf einen vollfaktoriellen 2^6 Versuchsplan (6 Faktoren auf 2 Stufen). Dabei kommt es zu keiner Überlagerung von Haupteffekten und Wechselwirkungen. Jeder Effekt kann für sich bestimmt werden. Die Aussagekraft der Ergebnisse ist entscheidend höher. Da es sich im Rahmen dieser Arbeit um eine quantitative Untersuchung handelt, wird der durch eine vollfaktorielle Untersuchung entstehende Mehraufwand in Kauf genommen. Ferner ist der Aufwand für einzelne Messungen relativ gering, weshalb es auch aus wirtschaftlichen Gründen nicht zwingend notwendig ist, den Aufwand stark einzugrenzen.

5.4.1 Anzahl der Realisierungen

Für das gewählte Versuchsdesign müssen laut Gleichung (3.10) mindestens $n_r = 2^6 = 64$ Messungen durchgeführt werden, um den Gesamtversuch einmal zu realisieren. Um eine Berechnung der Versuchsstreuung bzw. des statistischen Fehlers möglich zu machen, sind mindestens zwei Realisierungen notwendig.

Da im Vorfeld mangels Erfahrung keine Aussage über die vorhandene Messstreuung der Wirkungsgradmessung gemacht werden kann, werden Vorversuche angestellt. Dabei wird einige zufällige Faktorstufenkombinationen mehrmals wiederholt und für diese Messwerte die empirische Standardabweichung der Stichprobe, also ein Schätzwert für die Standardabweichung der Grundgesamtheit, errechnet (vgl. Abschnitt 3.2).

Tabelle 5-4 zeigt die Ergebnisse jener Faktorstufenkombination bei der die größte Messstreuung festgestellt wird.

Tabelle 5-4: Messergebnisse des Vorversuchs zur Ermittlung der Standardabweichung

Ergebnisse: Messreihe 16x2mm				
Nr	Hubgeschwindigkeit	Belastung	Reibwert	Wirkungsgrad
[-]	[mm/s]	[N]	[-]	[%]
1	30,0	805,7	0,131	23,3
2	30,0	803,7	0,144	21,7
3	30,0	803,3	0,125	24,2
4	30,0	801,2	0,146	21,4
5	30,0	805,4	0,140	22,1
6	30,0	801,3	0,128	23,8
7	30,0	801,5	0,174	18,6
8	29,3	796,4	0,133	23,1
9	29,6	795,7	0,155	20,4
10	28,4	795,4	0,113	26,0
Mittelwert:				22,4
Standardabweichung:				2,1

Wie zu erkennen ist, wird dieselbe Messung zehnmals wiederholt. Dabei wird darauf geachtet, dass es sich dabei um „echte“ Wiederholungen handelt. Vor jeder Messung werden Gleitgeschwindigkeit und Axialbelastung variiert und neu eingestellt. Zudem wird die Spindel aus- und eingebaut, um Positionierfehler mit zu berücksichtigen und maximale Versuchsstreuung zu simulieren.

Der technologisch relevante Unterschied $\Delta\mu$ bezüglich des Wirkungsgrades wird mit 1% festgelegt. Mit Gleichung (3.11) lässt sich der erforderliche Versuchsumfang $N \approx 60 \cdot \left(\frac{\sigma}{\Delta\mu}\right)^2 = 60 \cdot \left(\frac{2,1}{1}\right)^2 = 263,9$ bestimmen. Für die Anzahl der Realisierungen folgt schließlich $n \approx \frac{N}{m} = \frac{263,9}{64} = 4,1 \approx 4$. Jede Messung muss viermal realisiert werden.

5.4.2 Versuchsdurchführung

Da es zu zeitaufwendig ist alle Versuche hintereinander durchzuführen, wird je eine Realisierung pro Tag durchgeführt. Um mögliche Auswirkungen von Veränderungen zwischen den einzelnen Tagen, wie beispielsweise eine Veränderung am Messsystem oder ein starker Wechsel der Umgebungsbedingungen, im Nachhinein erkennen zu können, werden die einzelnen Realisierungen als Blöcke definiert. Zudem werden die einzelnen Messungen in randomisierter Reihenfolge durchgeführt, um etwaigen Trends entgegenzuwirken.

Die vorangegangenen Vorversuche zeigen, dass das längere lagern der Spindeln bei erhöhter Umgebungstemperatur (70°C) einen Einfluss auf das Wirkungsgradverhalten der ersten Hubvorgänge hat. Ein Einlaufverhalten ist erkennbar. Darum wird ein automatisches Prüfprogramm erstellt, das die gesamte Spindellänge viermal mit einer Hubgeschwindigkeit von 30mm/s ohne Last abfährt und erst anschließend eine Messfahrt mit richtiger Geschwindigkeit ausführt.

Der Versuchsplan wird mit Hilfe des DoE Softwarepaket Design-Experts® Softwareversion 9 generiert. Eine Darstellung des gesamten Versuchsplans befindet sich im Anhang.

5.5 Ergebnisse und Auswertung

Eine gesamte Messfahrt beträgt 160mm Hublänge. Um Anfahr- und Bremswirkungen aufgrund von Massekräften auszuschließen, bleiben die Anfangs- und Endwerte unberücksichtigt. Mit Hilfe des Softwarepakets MATLAB® werden die Rohdaten aufbereitet, die Messwerte zwischen 30mm und 140mm gemittelt und zur Auswertung herangezogen. Die berechneten Wirkungsgrade werden anschließend als Tabelle ausgegeben, um einen Import in den Versuchsplan zu ermöglichen.

Die Auswertung des Versuchsplans erfolgt ebenfalls mit MATLAB®. Zusätzlich kam die DoE Software Design-Experts® Softwareversion 9 zum Einsatz. Dafür gibt es zwei Gründe. Zum einen werden die Auswertungen der beiden Programme verglichen, um abgesicherte Ergebnisse zu erhalten. Zum anderen soll im Zuge dieser Arbeit herausgefunden werden, ob MATLAB alleine ausreichend ist, um Versuchspläne auszuwerten und welcher Aufwand damit verbunden ist. Weiters soll zusätzlich Design-Experts® getestet werden, um Erfahrungen für einen eventuellen zukünftigen Einsatz zu sammeln.

Tabelle 5-5 zeigt die Ergebnisse des Screeningversuchs in systematischer Reihenfolge ohne Berücksichtigung der eingeführten Blockfaktoren. Zum Vergleich befindet sich im Anhang die Auswertung mit Blockfaktoren. Man kann erkennen, dass sich die Ergebnisse nur marginal unterscheiden. Es kann somit nachgewiesen werden, dass es keinen systematischen Unterschied zwischen den einzelnen Tagen gibt.

Auch aus Tabelle 5-6 geht hervor, dass die Realisierungen eine gute Übereinstimmung aufweisen. Die Unterschiede sind rein zufällig. Die Blockfaktoren sind statistisch nicht signifikant und können somit bei der weiteren Auswertung vernachlässigt werden.

Tabelle 5-6: Vergleich der vier Realisierungen

Wirkungsgrad [%]	1. Realisierung	2. Realisierung	3. Realisierung	4. Realisierung
Mittelwert	51,8	51,4	51,7	52,0
Standardabweichung	15,6	16,6	15,9	15,7
Minimum	19,0	20,8	19,8	19,8
Maximum	77,1	80,2	78,0	78,7

Es werden bei der Auswertung nur die Haupteffekte und Zweifachwechselwirkungen berücksichtigt. Zum einen sind Wechselwirkungen höherer Ordnung in der Realität selten von Bedeutung und zum anderen sind sie schwierig zu interpretieren. Für das Screening wird aus diesem Grund auf ihre Auswertung verzichtet. Es bleiben somit 6 Haupteffekte und 15 Zweifachwechselwirkungen.

Die Spalte „mean_response“ in Tabelle 5-5 zeigt für jede Faktorstufenkombination den gemittelten Wirkungsgrad über die vier Wiederholungen. Der Gesamtmittelwert beträgt 51,7%. In der letzten Spalte („stdev“) werden die Standardabweichungen der Wiederholungen berechnet. Daraus können Ausreißer erkannt werden. Als auffällig erscheinen die Kombinationen Nr. 2 und Nr. 50. Bei beiden beträgt die Standardabweichung

ungefähr 10% des Mittelwertes. Wie es zu dieser Abweichung gekommen ist, kann im Nachhinein nicht festgestellt werden. Auf eine Wiederholung der Versuche wird verzichtet, da zwei Ausreißer bei der einer Anzahl von 64 Kombinationen kaum ins Gewicht fallen. Zudem ist dies für einen Screeningversuch nicht unbedingt notwendig. Die Standardabweichungen der übrigen Messungen weisen sehr gute Ergebnisse auf. Ein Großteil davon liegt unter 5% des Gesamtmittelwertes.

5.5.1 Mittelwertvergleich

Die Auswertung erfolgt mit dem in Abschnitt 3.5.3 behandelten Mittelwertvergleich. Die Faktorbezeichnungen werden, der Einfachheit halber, durch Buchstaben ersetzt. Tabelle 5-7 zeigt die Nomenklatur der Faktoren. Zur Auswertung werden die Faktorstufen durch Normierung mit

$$\text{normierter Wert} = \frac{\text{Stufenwert} - \text{Mittelwert}}{\text{halbe Differenz}} \quad (5.2)$$

auf die Werte -1 und +1 umgerechnet, wodurch sich die Effekte direkt in der Dimension der Zielgröße errechnen lassen [8, p. 197].

Tabelle 5-7: Nomenklatur der Faktoren

Name	Bezeichnung
Belastung	A
Gleitgeschwindigkeit	B
Spindeldurchmesser	C
Spindelsteigung	D
Kin. Viskosität	E
Temperatur	F

Aufgrund der zweistufigen Faktoren kann auf eine Varianzanalyse verzichtet werden. Die Effekte der Faktoren sind in der vorletzten Zeile (Tabelle 5-3) angegeben. Um Ihre statistische Signifikanz zu bewerten, werden sie mit den 97,5%, 99% und 99,9% Vertrauensbereichen verglichen. Für die Standardabweichung der Effekte ergibt sich laut Gleichung (3.7) mit dem Mittelwert der Einzelvarianzen s^2 und dem Versuchsumfang N :

$$s_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{4}{N} \cdot s^2} = \sqrt{\frac{4}{256} \cdot 3,63} = 0,2382 \text{ [\%]}.$$

Das zu bestimmende Modell besitzt ohne Mittelwert 21 Parameter, bestehend aus 6 Hauptfaktoren und 15 Zweifachwechselwirkungen. Zur Verfügung stehen 256 Versuchsergebnisse. Für die Vertrauensbereiche folgt, abzüglich des Gesamtmittelwertes, für $d_f = 256 - 21 - 1 = 234$ Freiheitsgrade:

$$97,5\%: \quad t \cdot s_{\bar{a}} = 2,2559 * 0,2382 = 0,537 \text{ [%]}$$

$$99,0\%: \quad t \cdot s_{\bar{a}} = 2,5970 * 0,2382 = 0,619 \text{ [%]}$$

$$99,9\%: \quad t \cdot s_{\bar{a}} = 3,3326 * 0,2382 = 0,794 \text{ [%]}$$

Wie oben erwähnt können durch Normierung der Faktorstufen die Effekte direkt in der Zielgrößendimension errechnet werden, in diesem Fall in % Wirkungsgrad. Die Berechnung der Vertrauensbereiche lässt somit erkennen, dass ein Effekt, welcher eine Änderung von mehr als 0,794% Spindelwirkungsgrad hervorruft, mit 99,9% Wahrscheinlichkeit erkannt wird. In Abschnitt 5.4.1 wird definiert, dass ein Wirkungsgradunterschied von 1% als technisch relevant anzusehen ist. Daraus errechnet sich, dass bei vorhandener Versuchsstreuung vier Realisierungen notwendig sind. Um auf der sicheren Seite zu sein, wird dieser Rechnung jenes Spindelsystem zugrunde gelegt, welches in den Vorversuchen die höchste Versuchsstreuung aufwies. Die übrigen Spindelsysteme streuen teilweise bedeutend weniger, womit sich erklären lässt, warum es nun möglich ist einen relevanten Unterschied von 0,794% zu erkennen.

Die letzte Zeile in Tabelle 5-5 zeigt die Bewertung der statistischen Signifikanz, wobei *** als hochsignifikant eingeschätzt wird. Es ist zu erkennen, dass die Wechselwirkungen AB, AC, AF, BD und CE keinen signifikanten Einfluss auf den Wirkungsgrad aufweisen. AD und BC werden als signifikant (**) eingestuft. Alle restlichen Wechselwirkungen und Faktoren stellen sich als hochsignifikant (***) heraus, wobei AE und DE unter der 1% Schwelle liegen.

5.5.2 Interpretation der Haupteffekte

Abbildung 5-2 zeigt die Gegenüberstellung der bestimmten Haupteffekte. Die Effekte des Mittelwertvergleichs können direkt abgelesen werden, wie beispielsweise der Effekt der Belastung e_A mit einem Wert von 3,17%. Dieser stellt sich ein, wenn die Belastung von Low-Level -1 (200N) auf High-Level +1 (800N) bei gleichzeitiger Mittelstellung aller anderen

Faktoren verändert wird. Das ist am dargestellten Gesamtmittelwert von 51,7% zu erkennen.

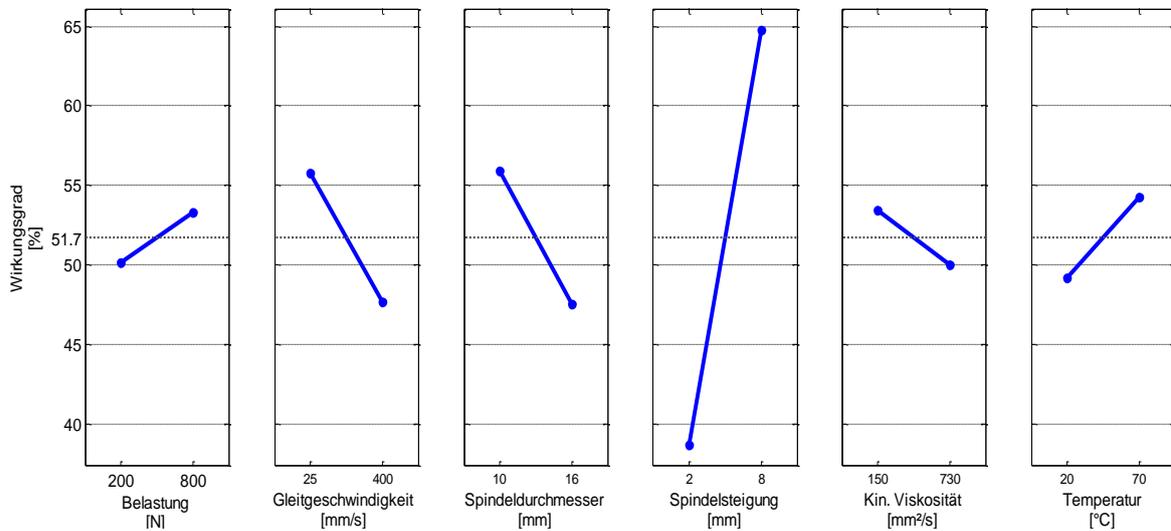


Abbildung 5-2: Effektplots der Haupteffekte des 2^6 Designs

Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass man aus den bekannten Größen direkt ein lineares Beschreibungsmodell ableiten kann. Die Zielgröße y berechnet sich aus den Haupteffekten mit

$$y = \bar{y} + \frac{e_A}{2} \cdot A + \frac{e_B}{2} \cdot B + \frac{e_C}{2} \cdot C + \frac{e_D}{2} \cdot D + \frac{e_E}{2} \cdot E + \frac{e_F}{2} \cdot F, \quad (5.3)$$

wobei \bar{y} den Gesamtmittelwert, $e_A - e_F$ die Effekte der Faktoren und $A - F$ die Faktoren in normierter Form beschreiben. Die Schätzwerte für die linearen Koeffizienten b_i des Modells können beim Mittelwertvergleich somit direkt aus den Effekten e_i mit

$$b_i = \frac{e_i}{2} \quad (5.4)$$

berechnet werden.

Zum identen Ergebnis würde man gelangen, wenn die Auswertung mit Varianzanalyse oder Regressionsanalyse geschieht. Bei zweistufigen Faktoren sind diese drei Verfahren äquivalent. Im Vergleich zu den anderen beiden Verfahren hat der Mittelwertvergleich den Vorteil, dass er das simpelste Verfahren darstellt. Die Ergebnisse sind einfach zu interpretieren und gut nachvollziehbar. Außerdem wird für diese Methode nicht zwingend eine spezielle Software benötigt. [8, p. 197]

Die ermittelten Effekte von Spindeldurchmesser und Spindelsteigung überdecken sich mit den Tendenzen des theoretischen analytischen Modells zur Bestimmung von Spindelwirkungsgraden (siehe Gleichung (2.11)). Eine Erhöhung der Spindelsteigung lässt den Wirkungsgrad steigen und umgekehrt sinkt er mit zunehmendem Spindeldurchmesser. Die Steigung fließt linear in das analytische Modell ein. Der Durchmesser wird durch den Kehrwert berücksichtigt. Die Funktion x^{-1} kann für Werte $x > 2$ in sehr guter Näherung als linear angenommen werden. Die lineare Beschreibungsfunktion, die aus der Screeninguntersuchung resultiert, ist somit vollkommen ausreichend um die gesuchten Zusammenhänge zu beschreiben.

Auch der Einfluss der Gleitgeschwindigkeit und der kinematischen Viskosität lassen sich physikalisch untermauern. Schmierfette gelten allgemein als nicht-newtonsche Fluide und weisen somit kein zeit- und schergeschwindigkeitsunabhängiges Viskositätsverhalten auf. Trotzdem gilt im vorhandenen Einsatzbereich der Grundsatz, dass die Schubspannung im Schmierpalt sowohl mit steigender Gleitgeschwindigkeit, als auch mit steigender kinematischer Viskosität zunimmt. Damit steigt der Widerstand im Schmierpalt, was sich in einem erhöhten Reibwert und schlechteren Wirkungsgrad widerspiegelt. Selbiges zeigen die ermittelten mathematisch negativen Effekte für diese beiden Faktoren. [10, p. 59ff]

Auch das Verhalten der Werkstoffe zueinander lassen auf selbiges Ergebnis schließen. Im Zuge einer tribologischen Untersuchung wurden für LOGICDATA verschiedene Kunststoffe im Trockenversuch mittels Tribometer auf ihr Reibverhalten gegenüber einer Stahloberfläche untersucht. Dabei zeigt sich für POM (Polyoxymethylen) eine eindeutige Zunahme des Reibwertes für erhöhte Gleitgeschwindigkeiten (siehe Abbildung 5-3).

Die Temperaturabhängigkeit der kinematischen Viskosität kann ebenfalls physikalisch nachgewiesen werden. Die Viskosität der meisten Fluide nimmt mit steigender Temperatur, aufgrund verschiedener physikalischer Effekte, ab [10, p. 60f]. Auch aus dem Produktdatenblatt der verwendeten Schmierfette (siehe Anhang) ist eine Abnahme der kinematischen Viskosität des verwendeten Grundöls bei steigender Temperatur zu entnehmen. Daraus ergibt sich ein mathematisch positiver Effekt für den Wirkungsgrad des Spindel systems.

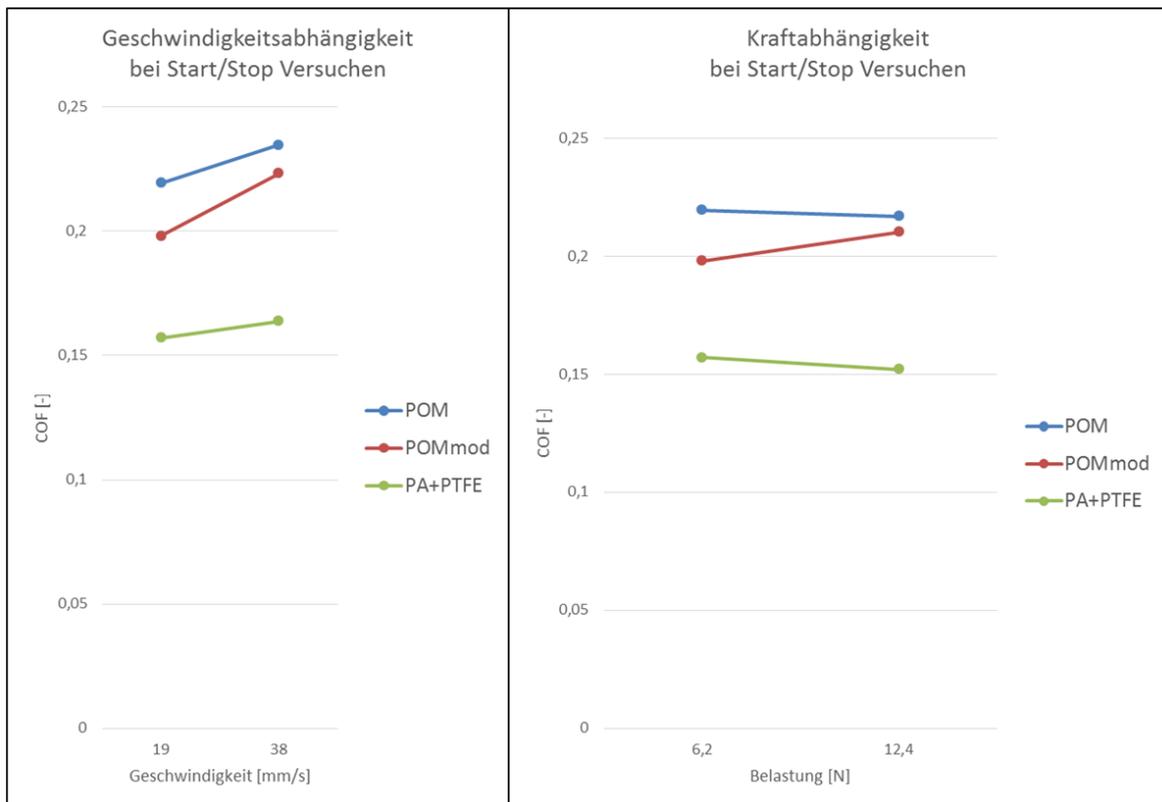


Abbildung 5-3: Ergebnisse der Tribologieuntersuchung (PCCL Leoben, 2014)

Aus der oben erwähnten Tribologieuntersuchung geht ferner hervor, dass die Flächenpressung zwischen den Reibflächen einen Einfluss auf den Reibwert aufweist. Tendenziell stimmt dieser mit dem im Versuch ermittelten Effekt überein. Mit steigender Belastung nimmt der Wirkungsgrad zu (siehe Abbildung 5-3). Im Laborversuch ist jedoch ein geringerer Einfluss zu erkennen. Der Laborversuch wurde (wie oben erwähnt) ohne Schmiermittel durchgeführt. Somit ist ein quantitativer Vergleich nicht direkt zulässig.

5.5.3 Interpretation der Wechselwirkungen

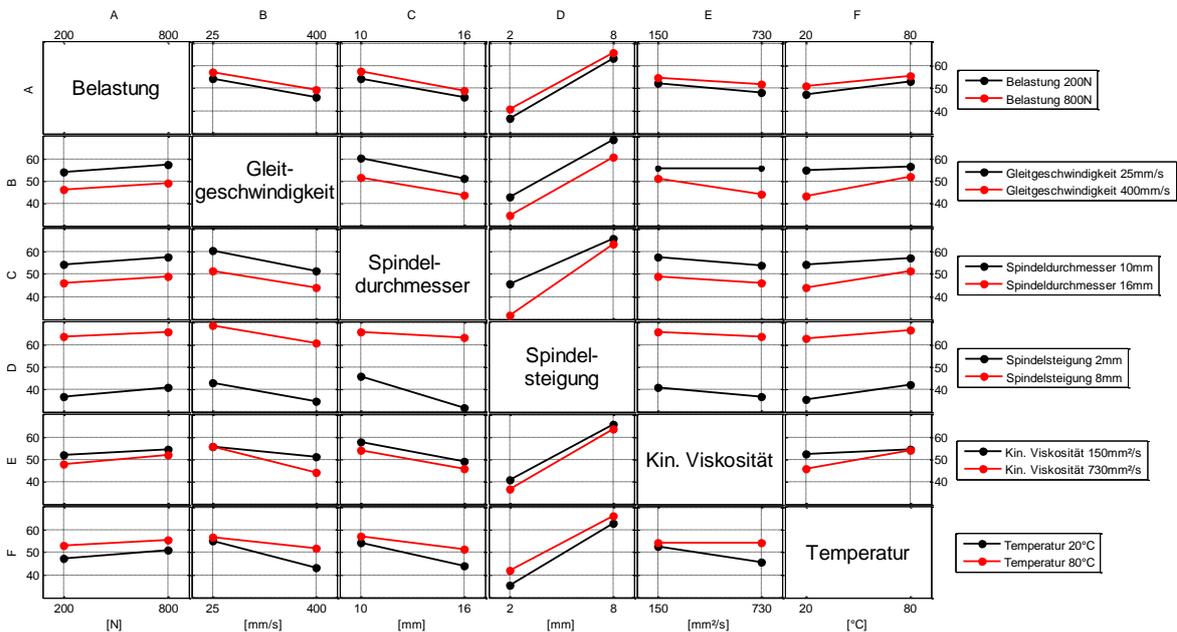


Abbildung 5-4: Effektplots der Zweifachwechselwirkungen des 2^6 Designs

Die ermittelten Zweifachwechselwirkungen sind in Abbildung 5-4 grafisch dargestellt. Wie unter Abschnitt 5.5.1 beschrieben, sind die Effekte AE, BE, BF, CD, CF, DE, DF und EF als hochsignifikant einzustufen. Da AE und DE jedoch unter der technisch relevanten 1% Grenze liegen, werden diese von der Auswertung ausgenommen. Die oben ermittelte Gleichung (5.3) kann somit zu

$$y = \bar{y} + \dots + \frac{e_{BE}}{2} \cdot B \cdot E + \frac{e_{BF}}{2} \cdot B \cdot F + \frac{e_{CD}}{2} \cdot C \cdot D + \frac{e_{CF}}{2} \cdot C \cdot F + \frac{e_{DF}}{2} \cdot D \cdot F + \frac{e_{EF}}{2} \cdot E \cdot F \quad (5.5)$$

erweitert werden.

Eine physikalische Interpretation der Wechselwirkungen erweist sich in der Regel als schwierig. Die Wechselwirkung zwischen Durchmesser und Steigung (CD) ergibt sich aus den Wirkungsgradmodellen, welche in Abschnitt 2.3 näher beschrieben werden. Dass der Einfluss der Gleitgeschwindigkeit von der kinetischen Viskosität (BE) und der Temperatur (BF) abhängt und auch die Viskosität mit der Temperatur (EF) wechselwirkt, ist qualitativ über die Eigenschaften von nicht-newtonschen Fluiden erklärbar. Ein Temperatureinfluss auf Spindeldurchmesser (CF) und Spindelsteigung (DF) war jedoch nicht zu erwarten.

Daran ist die Stärke der Versuchsplanung erkennbar. Kein physikalisches Modell hätte diese Wechselwirkungseffekte im Vorfeld vollständig abbilden können. Auch bei einfachen „One factor at a time“ Versuchen sind sie nicht bestimmbar.

5.5.4 Wirkungsgradmodell

Durch Einsetzen der, in Tabelle 5-5 dargestellten, normierten Effekte in Gleichung (5.5), ergibt sich direkt das lineare Regressionsmodell des Screeningversuchs. Dieses Modell setzt voraus, dass die Faktoren in normierter Form vorliegen. Durch Einsetzen von Gleichung (5.2) in Gleichung (5.5) und auflösen, können die Effekte rücktransformiert werden.

Tabelle 5-8: Regressionskoeffizienten des Screeningversuchs

Bezeichnung	\bar{y}	e_A	e_B	e_C	e_D	e_E	e_F	e_{BE}	e_{BF}	e_{CD}	e_{CF}	e_{DF}	e_{EF}
normierter Effekt	-	3,17	-8,16	-8,37	26,15	-3,42	5,14	-3,61	3,56	5,83	2,27	-1,76	3,25
linearer Koeffizient (transformiert)	51,72	1,59	-4,08	-4,19	13,08	-1,71	2,57	-1,81	1,78	2,92	1,14	-0,88	1,63
linearer Koeffizient (rücktransformiert)	80,23	5,29E-03	-2,42E-02	-3,70E+00	6,74E-01	-8,93E-03	-2,14E-01	-3,32E-05	3,80E-04	3,24E-01	1,51E-02	-1,17E-02	2,24E-04

Aus dem durchgeführten Screeningversuch können die in Tabelle 5-8 dargestellten rücktransformierten Effekte abgeleitet werden. Daraus ergibt sich folgendes rücktransformiertes Regressionsmodell, in welches die Faktoren in ihrer wahren Dimension eingesetzt werden können.

$$\begin{aligned}
 \text{Wirkungsgrad} = & 80,23 \\
 & 5,29E-003 * \text{Belastung} \\
 & -2,42E-002 * \text{Gleitgeschwindigkeit} \\
 & -3,70E+000 * \text{Spindeldurchmesser} \\
 & 6,74E-001 * \text{Spindelsteigung} \\
 & -8,93E-003 * \text{Kin. Viskosität} \\
 & -2,14E-001 * \text{Temperatur} \\
 & -3,32E-005 * \text{Gleitgeschwindigkeit} * \text{Kin. Viskosität} \\
 & 3,80E-004 * \text{Gleitgeschwindigkeit} * \text{Temperatur} \\
 & 3,24E-001 * \text{Spindeldurchmesser} * \text{Spindelsteigung} \\
 & 1,51E-002 * \text{Spindeldurchmesser} * \text{Temperatur} \\
 & -1,17E-002 * \text{Spindelsteigung} * \text{Temperatur} \\
 & 2,24E-004 * \text{Kin. Viskosität} * \text{Temperatur}
 \end{aligned}$$

Abbildung 5-5: Regressionsmodell des Screeningversuchs

5.6 Teilfaktorieller Versuchsplan

Wie oben erwähnt werden für ein Faktorscreening häufig teilfaktorielle (fraktionelle) Versuchspläne eingesetzt. Grund dafür ist ihr hohe Effizienz. Es ist möglich bei der Auswertung gezielt auf Information zu verzichten und den Versuchsaufwand dadurch entscheidend zu reduzieren. Gezielt bedeutet, dass im Vorfeld bestimmt wird welchen Detaillierungsgrad man erreichen möchte.

Auf den folgenden Seiten wird die Anwendung eines teilfaktoriellen Designs auf die unter Abschnitt 1.3 beschriebene Aufgabenstellung gezeigt. Es wird dabei nicht umfassend auf den theoretischen Hintergrund von teilfaktoriellen Versuchsplänen eingegangen. Dafür wird auf die Literatur verwiesen [8, p. 129ff] [18, p. 26ff]. Ziel ist es herauszufinden, ob es sinnvoll ist ein solches Design einzusetzen. Es soll ermittelt werden, welche Informationen dadurch verloren gehen. Um die Unterschiede aufzuzeigen, wird das resultierende Modell anschließend mit dem der vollfaktoriellen Untersuchung verglichen.

5.6.1 Grundlagen

Gleichung (3.10) beschreibt den exponentiellen Anstieg des Versuchsaufwands mit zunehmender Faktorzahl. Betrachtet man die resultierenden Modelle aus Versuchsplänen mit mehreren Faktoren, so fällt auf, dass vor allem die Anzahl der Parameter für höherwertige Wechselwirkungen stark ansteigt (siehe Tabelle 5-9). Da diese in der Praxis kaum relevant sind, besteht die Möglichkeit die vorhandenen Daten anderwärtig zu nutzen. Anstatt höherwertiger Wechselwirkungen werden weitere Faktoren untersucht. Der Versuchsumfang bleibt gleich. Folglich wird also nur mehr ein Teil eines vollständigen Versuchsplans untersucht. Diese Pläne werden auch als fraktionelle Designs bezeichnet. [8, p. 130f]

Dieses Vorgehen bringt einen Nachteil mit sich. Die einzelnen Effekte können nicht eindeutig bestimmt werden. Es kommt zur Überlagerung (Vermengung). Ist beispielsweise ein Haupteffekt mit einer 2FWW vermengt, kann mit Hilfe von Statistik nicht ermittelt werden, ob der errechnete Effekt von dem Einzelfaktor, der Wechselwirkung oder von beiden stammt. Nur durch technische Überlegungen wäre eine Trennung möglich. Welche Einflüsse miteinander überlagert sind, hängt von der Wahl des Versuchsplans ab. Je mehr der

Aufwand verringert wird, desto mehr Vermengungen treten auf. Es hängt vom geforderten Ergebnis der Untersuchung ab, für welches Design man sich entscheidet. [8, p. 132ff]

Tabelle 5-9: Anzahl der Effekte in Abhängigkeit der Faktoranzahl

Anzahl der Faktoren	Anzahl der Effekte		
	Haupteffekte	2FWW	3FWW, 4FWW,...
1	1	-	-
2	2	1	-
3	3	3	1
4	4	6	5
5	5	10	16
6	6	15	42
7	7	21	99
8	8	28	219

5.6.2 Der Versuchsplan

Da diese Untersuchung ein hochwertiges Vorhersagemodell zum Ziel hat, ist eine zu starke Vermengungsstruktur nicht zulässig. Eine eindeutige Bestimmbarkeit der Haupt- und Zweifachwechselwirkungseffekte ist zwingend. Die Art der Überlagerung wird durch die sogenannte Auflösung oder auch Resolution beschrieben.

Tabelle 5-10: Auflösung von Versuchsplänen

Auflösung	Vermengung
III	Haupteffekte mit 2FWW
IV	Haupteffekte mit 3FWW 2FWW mit 2FWW
V	Haupteffekte mit 4FWW 2FWW mit 3FWW
VI	Haupteffekte mit 5FWW 2FWW mit 4FWW 3FWW mit 3FWW

Ohne die genauen Hintergründe aufzurollen, dient Tabelle 5-10 zur Bewertung von teilfaktoriellen Designs. Ab einer Resolution größer IV werden die Überlagerungen als unkritisch eingestuft, da sowohl Haupteffekte als auch Zweifachwechselwirkungen nur mit höherwertigen Wechselwirkungen vermengt sind. Sie sind getrennt voneinander bestimmbar. Sobald es zur Vermengung von Haupteffekten und Zweifachwechselwirkungen kommt (Auflösung kleiner III) werden Versuchspläne als sehr kritisch bewertet. Sie sollten nur zur

Anwendung kommen, wenn im Vorfeld klar ist, dass es entweder keine Wechselwirkungen gibt oder diese vernachlässigbar klein sind.

Ausgehend vom vollfaktoriellen 2^6 Versuchsplan (6 Faktoren auf 2 Stufen) mit 64 Versuchen stehen die in Abbildung 5-6 gezeigten fraktionellen Pläne zur Verfügung. Es ist zu erkennen, dass mit der Resolution auch die Versuchszahl sinkt.

Versuche	8	2	$6-3$ III
	16	2	$6-2$ IV
	32	2	$6-1$ VI
	64	2	6

Abbildung 5-6: Teilfaktorielle Pläne für 6 Faktoren auf 2 Stufen

Da Wechselwirkungen nicht ausgeschlossen werden können, bietet sich ein 2^{6-1} Design an. Es besitzt die Auflösung VI. 2^{6-1} bedeutet, dass der Plan 6 Faktoren und 2^{6-1} Versuchskombinationen besitzt. Also um den Faktor 2^{-1} weniger als der vollständige 2^6 Plan. Es ergeben sich $2^{6-1} = 2^5 = 32$ Versuche je Realisierung. Der Aufwand wird somit halbiert. Daraus ergibt sich die in Tabelle 5-11 dargestellte Vermengungsstruktur.

Für vier Realisierung sind 128 Versuche notwendig. Auf eine Berücksichtigung von Blockfaktoren wird auf Grund der zuvor erlangten Erkenntnisse verzichtet. Die notwendigen Versuchsergebnisse werden aus den bestehenden Daten entnommen und zur Auswertung herangezogen. Der vollständige Versuchsplan wurde mit Design-Experts® erstellt und ist im Anhang zu finden. Zur Auswertung wurde zusätzlich MATLAB® eingesetzt.

Tabelle 5-11: Vermengungsstruktur des 2^{6-1} Designs

Haupteffekte		2FWW		3FWW	
Mittelwert	+ ABCDEF	AB	+ CDEF	ABC	+ DEF
A	+ BCDEF	AC	+ BDEF	ABD	+ CEF
B	+ ACDEF	AD	+ BCEF	ABE	+ CDF
C	+ ABDEF	AE	+ BCDF	ABF	+ CDE
D	+ ABCEF	AF	+ BCDE	ACD	+ BEF
E	+ ABCDF	BC	+ ADEF	ACE	+ BDF
F	+ ABCDE	BD	+ ACEF	ACF	+ BDEF
		BE	+ ACDF	ADE	+ BCF
		BF	+ ACDE	ADF	+ BCE
		CD	+ ABEF	AEF	+ BCD
		CE	+ ABDF		
		CF	+ ABDE		
		DE	+ ABCF		
		DF	+ ABCE		
		EF	+ ABCD		

5.6.3 Ergebnisse und Auswertung

Tabelle 5-12 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung. Der Gesamtmittelwert weicht mit 51,8% nur marginal vom zuvor ermittelten Wert ab. Das fraktionelle Design enthält nur die Hälfte des gesamten Plans. Durch Zufall wird die Hälfte mit geringerer Streuung in den Versuchsergebnissen ausgewählt. Jene Versuche, welche eine verhältnismäßig große Standardabweichung aufweisen (Nr.2 und Nr.50), sind nicht enthalten. Der Mittelwert aller geschätzten Varianzen s^2 ist somit mit 2,72% geringer als im Gesamtversuch. Für die Standardabweichung folgt mit Gleichung (3.7) und einem Versuchsumfang von $N = 128$:

$$s_{\bar{a}} = \sqrt{\frac{4}{N} \cdot s^2} = \sqrt{\frac{4}{128} \cdot 2,72} = 0,291[\%].$$

Die Vertrauensbereiche zur Abschätzung der

Signifikanz betragen für $d_f = 128 - 21 - 1 = 106$ Freiheitsgrade:

97,5%: $t \cdot s_{\bar{a}} = 2,2559 \cdot 0,291 = 0,656 [\%]$

99,0%: $t \cdot s_{\bar{a}} = 2,5970 \cdot 0,291 = 0,756 [\%]$

99,9%: $t \cdot s_{\bar{a}} = 3,3326 \cdot 0,291 = 0,970 [\%]$

Effekte größer als 0,97%, treten mit 99,9% Wahrscheinlichkeit nicht zufällig auf und gelten als höchstsignifikant (vgl. vollfaktorielles Design 0,794%). Der definierte technisch relevante Unterschied von 1% wird somit erkannt.

Tabelle 5-12: Ergebnisse der Screeningversuchs mit teilfaktoriellem Versuchsplan

Nr.	A	B	C	D	E	F	AB	AC	AD	AE	AF	BC	BD	BE	BF	CD	CE	CF	DE	DF	EF	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Mittelwert	Varianz	Stoab		
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	44,3	46,4	47,6	51,3	47,4	8,6	2,9		
2	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	60,9	60,1	60,7	60,9	60,6	0,1	0,4		
3	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	48,1	50,2	44,5	52,2	48,8	10,9	3,3		
4	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	40,2	37,3	40,7	43,0	40,3	5,4	2,3		
5	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	34,5	34,2	33,6	33,6	34,0	0,2	0,5		
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	33,4	33,1	32,7	35,8	33,8	2,0	1,4		
7	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	29,2	27,8	27,7	28,9	28,4	0,6	0,8		
8	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	37,1	35,2	36,4	34,5	35,8	1,3	1,1		
9	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	62,8	62,4	63,4	61,7	62,6	0,5	0,7		
10	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	73,2	76,6	74,3	73,1	74,3	2,7	1,7		
11	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	65,0	66,5	67,8	63,6	65,7	3,3	1,8		
12	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	62,9	60,2	62,0	61,5	61,7	1,3	1,1		
13	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	66,8	67,4	67,1	68,0	67,3	0,3	0,5		
14	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	65,0	69,8	67,6	66,6	67,2	4,1	2,0		
15	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	65,9	67,2	68,6	66,5	67,0	1,4	1,2		
16	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	58,6	64,8	60,2	60,8	61,1	6,8	2,6		
17	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	48,6	48,7	48,8	48,3	48,6	0,0	0,2		
18	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	47,6	48,4	51,3	51,0	49,6	3,4	1,8		
19	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	28,6	24,1	26,4	26,4	26,4	3,3	1,8		
20	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	48,0	41,2	43,1	43,8	44,0	8,4	2,9		
21	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	31,9	32,2	31,0	33,3	32,1	0,9	0,9		
22	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	38,3	39,8	39,9	40,4	39,6	0,8	0,9		
23	-1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	28,5	26,4	28,0	31,6	28,6	4,8	2,2		
24	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	25,1	22,1	22,2	24,8	23,5	2,6	1,6		
25	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	69,7	71,3	69,0	71,8	70,4	1,7	1,3		
26	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	71,3	71,1	71,6	70,6	71,1	0,2	0,4		
27	-1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	64,3	66,2	63,4	64,5	64,6	1,3	1,2		
28	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	61,8	58,5	60,2	60,6	60,3	1,8	1,4		
29	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	71,3	71,2	70,7	73,5	71,7	1,6	1,3		
30	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	61,7	62,3	61,7	63,8	62,4	0,9	1,0		
31	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	41,8	41,8	39,5	41,9	41,3	1,4	1,2		
32	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	67,0	68,5	68,4	64,2	67,0	4,0	2,0		
Sum:	47,4	-128,3	-135,5	414,2	-54,8	88,6	-1,5	-7,4	-18,6	20,3	-4,9	17,7	11,4	-51,3	52,4	84,3	-2,1	33,4	18,6	-28,3	49,9					86,9				
Effekt:	2,96	-8,02	-8,47	25,89	-3,43	5,54	-0,10	-0,46	-1,16	1,27	-0,30	1,10	0,71	-3,21	3,27	5,27	-0,13	2,09	1,16	-1,77	3,12						2,72			
	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	*	***	***	***	***	***	***	***	***						Mittelwert=	51,8		
																											s ² =	2,72		

Die Haupteffekte werden auch hier durchgängig als höchstsignifikant und die Wechselwirkungen AB, AC, AF, BD und CE als nicht oder wenig signifikant eingestuft. Trotz der höheren Signifikanzschwelle, werden anders als beim vollfaktoriellen Versuchsplan alle übrigen 2FWW als höchstsignifikant bewertet. Das liegt an der Größe der bestimmten Effekte, welche zum Teil höhere Werte als zuvor aufweisen. Hier kommt der Nachteil der fraktionellen Pläne zum Vorschein. Blickt man auf die Vermengungsstruktur in Tabelle 5-11, erkennt man, dass 2FWW mit 4FWW überlagert sind. Die 4FWW wirken sich je nach Gegebenheit erhöhend oder senkend auf die 2FWW aus. Es kann vorkommen, dass Effekte, welche im vollfaktoriellen Design knapp unter der Signifikanzschwelle liegen, nun darüber liegen. Auch der umgekehrte Fall ist denkbar. Eine nachträgliche Trennung ist nicht möglich. Wie sich dieser Fehler auf die Genauigkeit des Vorhersagemodells auswirkt, wird später gezeigt.

Aus den Ergebnissen kann folglich das in Abbildung 5-7 gezeigte, rücktransformierte Regressionsmodell abgeleitet werden. Es beinhaltet zusätzlich die Wechselwirkungen AD, AE, BC und DE.

$$\begin{aligned}
 \text{Wirkungsgrad} &= \\
 &81,79 \\
 &4,95\text{E-}003 \quad * \text{ Belastung} \\
 &-3,69\text{E-}002 \quad * \text{ Gleitgeschwindigkeit} \\
 &-3,71\text{E+}000 \quad * \text{ Spindeldurchmesser} \\
 &1,07\text{E+}000 \quad * \text{ Spindelsteigung} \\
 &-1,63\text{E-}002 \quad * \text{ Kin. Viskosität} \\
 &-1,80\text{E-}001 \quad * \text{ Temperatur} \\
 &-6,45\text{E-}004 \quad * \text{ Belastung} * \text{ Spindelsteigung} \\
 &7,31\text{E-}006 \quad * \text{ Belastung} * \text{ Kin. Viskosität} \\
 &9,81\text{E-}004 \quad * \text{ Gleitgeschwindigkeit} * \text{ Spindeldurchmesser} \\
 &-2,95\text{E-}005 \quad * \text{ Gleitgeschwindigkeit} * \text{ Kin. Viskosität} \\
 &3,49\text{E-}004 \quad * \text{ Gleitgeschwindigkeit} * \text{ Temperatur} \\
 &2,93\text{E-}001 \quad * \text{ Spindeldurchmesser} * \text{ Spindelsteigung} \\
 &1,39\text{E-}002 \quad * \text{ Spindeldurchmesser} * \text{ Temperatur} \\
 &6,67\text{E-}004 \quad * \text{ Spindelsteigung} * \text{ Kin. Viskosität} \\
 &-1,18\text{E-}002 \quad * \text{ Spindelsteigung} * \text{ Temperatur} \\
 &2,15\text{E-}004 \quad * \text{ Kin. Viskosität} * \text{ Temperatur}
 \end{aligned}$$

Abbildung 5-7: Regressionsmodell des teilfaktoriellen Screeningversuchs

6 Response Surface Design

Mit den in Kapitel 5 beschriebenen Versuchen werden zufriedenstellende Ergebnisse erzielt. Es handelt sich um eine zweistufige Untersuchung, welche eine Analyse auf Nichtlinearität unmöglich macht. Da diese nicht ausgeschlossen werden können, wird eine weitere Versuchsreihe durchgeführt. Das folgende Kapitel beschreibt dieses Vorgehen. Das entstehende Modell wird den Modellen der vorangegangenen Untersuchungen gegenübergestellt. Die Praxistauglichkeit wird abschließend mit Hilfe eines Verifizierungsversuchs analysiert.

6.1 Der Versuchsplan

Ziel dieses Designs ist es, vorhandene Nichtlinearitäten zu detektieren und diese gegebenenfalls in einem Beschreibungsmodell zu berücksichtigen. Da aus dem Screening bekannt ist, dass alle sechs Faktoren als höchstsignifikant einzustufen sind, kann keiner von der Untersuchung ausgenommen werden.

Für ein quadratisches Modell sind mindestens drei Stufen je Faktor notwendig. Mit Gleichung (3.10) würde ein vollfaktorielles Design einen Aufwand von $3^6 = 729$ Versuche per Realisierung bedingen. Es muss eine Vereinfachung getroffen werden. Aus Gleichung (2.7) ist bekannt, dass Spindeldurchmesser und -steigung einen nichtlinearen Einfluss auf den Wirkungsgrad ausüben. Da der untersuchte Bereich sehr begrenzt ist, fällt dieser gering aus. Er kann mit ausreichender Genauigkeit als Gerade angenähert werden. Zwei Stufen sind für diese Parameter ausreichend. Es kann die Versuchszahl auf $3^4 \cdot 2^2 = 324$ verringert werden, was weiterhin einen unwirtschaftlichen Aufwand bedeutet und einen Einsatz von teilfaktoriellen Plänen sinnvoll macht. Da die Stufenanzahl der Faktoren durch die Vereinfachung unterschiedlich ist, ist eine Verwendung der unter Abschnitt 3.6.1 beschriebenen Standardpläne ausgeschlossen. Aus diesem Grund fällt die Auswahl auf ein D-Optimales Design (siehe Abschnitt 3.6.2).

Die Erstellung und Auswertung erfolgt mit Design Experts®. Auf den Einsatz von MATLAB® wird verzichtet. Die darin enthaltenen Tools erlauben zwar den Umgang mit optimalen Designs, die Möglichkeiten im Vergleich zur speziellen DoE Software sind dagegen begrenzt.

Für detaillierte Untersuchungen sind vier bis fünf Faktorlevels empfehlenswert. Um den Versuchsaufwand so gering wie möglich zu halten, wird den Faktoren (mit Ausnahme von Spindeldurchmesser und -steigung) nur ein Centerpunkt hinzugefügt. In Tabelle 6-1 sind die gewählten Faktorstufen zusammengefasst. Das Beschreibungsmodell erweitert sich um die quadratischen Terme zu

$$y = \bar{y} + \dots + \frac{e_{AA}}{2} \cdot A^2 + \frac{e_{BB}}{2} \cdot B^2 + \frac{e_{EE}}{2} \cdot E^2 + \frac{e_{FF}}{2} \cdot F^2. \quad (6.1)$$

Tabelle 6-1: Faktorstufen des Response Surface Design

Name	Bezeichnung	Dimension	Low	Middle	High
Belastung	F	N	200	500	800
Gleitgeschwindigkeit	v	mm/s	25	221,5	400
Spindeldurchmesser	d	mm	10	-	16
Spindelsteigung	P_h	mm	2	-	8
Kinematische Viskosität	v	mm ² /s	150	500	730
Temperatur	T	°C	20	45	70

Für die Mittelstellung der kinematischen Viskosität wird das Fett der Type POLYLUB GLY 501 verwendet. Es besitzt eine kinematische Viskosität von 500mm²/s (siehe Anhang). Der genaue Mittelwert würde 440mm²/s betragen, was bedeutet, dass der entstehende Versuchsplan von der Orthogonalität abweicht. Um die resultierenden Auswirkungen zu bewerten, müssen Diagnoseverfahren eingesetzt werden.

Für D-Optimale Pläne muss die Anzahl der Versuche vom Anwender vorgegeben werden. Um die Mächtigkeit dieser Methode zu testen, wird eine teilfaktorielle Untersuchung mit einem Versuchsumfang von 150 Versuchen festgelegt. Das Design befindet sich im Anhang. Die Eckpunkte des Versuchsraums gleichen sich mit denen des Screenings. Sie müssen nicht neu vermessen werden. Von den 150 festgelegten Versuchen sind 58 unbekannt. Sie sind im Anhang grau hinterlegt.

Durch die nicht orthogonale Anordnung der Versuchspunkte kommt es zu einer Korrelation der Regressionskoeffizienten. Sie überdecken sich gegenseitig und sind nicht mehr eindeutig auswertbar. Mit Hilfe der Korrelationsmatrix kann dies im Vorfeld untersucht werden. Sie zeigt die Korrelationskoeffizienten der Effekte und ist in Abbildung 6-1 dargestellt. Die

Koeffizienten nehmen nur Werte zwischen -1 und +1 an, wobei 0 bedeutet, dass keine Korrelation vorhanden ist. Bei einem vollkommen orthogonalen Versuchsplan erscheint die Matrix als Diagonalmatrix deren Hauptdiagonalen Einsen und deren restlichen Felder Nullen beinhaltet. Die Effekte korrelieren mit sich selbst.

	MW	A	B	C	D	E	F	AB	AC	AD	AE	AF	BC	BD	BE	BF	CD	CE	CF	DE	DF	EF	AA	BB	EE	FF	
MW	1,00	0,02	0,03	-0,02	0,01	-0,01	-0,04	0,01	0,00	0,00	-0,01	-0,02	0,00	-0,03	0,00	-0,03	0,05	0,01	0,01	0,03	-0,01	0,02	-0,37	-0,41	-0,42	-0,52	
A	0,02	1,00	-0,01	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,03	0,00	-0,02	0,00	0,01	-0,02	0,00	0,02	0,03	0,03	0,00	0,02	0,03	0,01	0,00	-0,02	-0,02	0,00	
B	0,03	-0,01	1,00	0,00	0,00	0,00	-0,02	-0,01	0,01	-0,02	0,00	0,02	0,01	-0,02	-0,01	0,00	0,00	-0,01	-0,05	0,00	0,01	-0,01	-0,01	0,01	-0,04	0,00	
C	-0,02	0,00	0,00	1,00	0,02	-0,02	0,01	0,01	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,04	0,00	-0,01	-0,02	-0,02	-0,01	0,01	0,04	0,00	0,01	-0,01	
D	0,01	0,00	0,00	0,02	1,00	0,02	-0,01	-0,02	0,03	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	-0,02	-0,01	-0,01	-0,02	-0,01	0,01	-0,03	-0,06	0,06	
E	-0,01	-0,01	0,00	-0,02	0,02	1,00	-0,02	0,00	0,02	0,02	-0,01	0,01	-0,01	0,00	-0,02	-0,01	-0,02	0,02	0,01	-0,02	-0,01	-0,02	-0,03	-0,01	0,09	-0,03	
F	-0,04	0,00	-0,02	0,01	-0,01	-0,02	1,00	0,03	0,00	0,03	0,01	0,00	-0,04	0,02	-0,01	0,00	-0,01	0,00	0,01	-0,01	0,02	-0,02	0,05	0,05	-0,03	-0,01	
AB	0,01	0,00	-0,01	0,01	-0,02	0,00	0,03	1,00	0,01	0,01	0,00	-0,01	0,01	0,01	-0,01	0,01	0,05	-0,01	-0,02	0,02	0,02	-0,03	0,00	0,00	-0,02	0,00	
AC	0,00	0,03	0,01	0,00	0,03	0,02	0,00	0,01	1,00	0,00	-0,02	0,00	-0,01	0,05	-0,01	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	-0,02	0,00	
AD	0,00	0,00	-0,02	0,03	0,00	0,02	0,03	0,01	0,00	1,00	0,00	0,05	-0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,01	0,03	-0,02	0,00	
AE	-0,01	-0,02	0,00	0,03	0,03	-0,01	0,01	0,00	-0,02	0,01	1,00	-0,04	-0,01	0,02	-0,01	-0,03	0,00	-0,01	0,02	-0,01	0,00	0,01	0,00	-0,02	-0,01	0,04	
AF	-0,02	0,00	0,02	0,00	0,03	0,01	0,00	-0,01	0,00	0,00	-0,04	1,00	-0,02	0,02	-0,02	-0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	-0,01	0,02	0,02	0,00	
BC	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	-0,01	-0,04	0,01	-0,01	0,05	-0,01	-0,02	1,00	0,01	-0,03	0,00	0,00	0,00	-0,02	0,02	0,01	-0,01	0,02	0,00	-0,01	0,00	
BD	-0,03	-0,02	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,05	-0,01	0,02	0,02	0,01	1,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	-0,02	-0,01	0,01	-0,01	0,04	0,00	
BE	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	0,01	-0,01	-0,02	-0,03	0,01	1,00	-0,02	0,01	0,00	-0,01	0,02	-0,01	0,01	0,00	0,00	-0,01	0,02	
BF	-0,03	0,02	0,00	-0,04	0,01	-0,01	0,00	0,01	-0,02	0,02	-0,03	-0,01	0,00	0,00	-0,02	1,00	0,02	-0,01	0,00	-0,01	0,00	0,01	0,00	-0,02	0,06	-0,01	
CD	0,05	0,03	0,00	0,00	0,01	-0,02	-0,01	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	1,00	0,03	-0,01	-0,02	0,01	-0,03	-0,06	-0,02	0,00	-0,01	
CE	0,01	0,03	-0,01	-0,01	-0,02	0,02	0,00	-0,01	0,00	0,00	-0,01	0,02	0,00	0,02	0,00	-0,01	0,03	1,00	-0,02	0,03	-0,03	0,01	-0,01	-0,03	0,00	-0,01	
CF	0,01	0,00	-0,05	-0,02	-0,01	0,01	0,01	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	-0,02	0,02	-0,01	0,00	-0,01	-0,02	1,00	-0,03	0,02	-0,02	-0,01	-0,02	0,01	0,00
DE	0,03	0,02	0,00	-0,02	-0,01	-0,02	-0,01	0,02	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,02	0,00	0,02	-0,01	-0,02	0,03	-0,03	1,00	-0,02	-0,01	-0,04	-0,03	0,01	0,02	
DF	-0,01	0,03	0,01	-0,01	-0,02	-0,01	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	-0,02	-0,01	0,00	0,01	-0,03	0,02	-0,02	1,00	0,03	0,02	0,02	-0,01	-0,01	
EF	0,02	0,01	-0,01	0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-0,03	0,02	0,00	0,01	0,01	-0,01	-0,01	0,01	0,01	-0,03	0,01	-0,02	-0,01	0,03	1,00	-0,04	0,00	0,00	-0,01	
AA	-0,37	0,00	-0,01	0,04	0,01	-0,03	0,05	0,00	0,00	0,01	0,00	-0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	-0,06	-0,01	-0,01	-0,04	0,02	-0,04	1,00	-0,08	-0,17	0,00	
BB	-0,41	-0,02	0,01	0,00	-0,03	-0,01	0,05	0,00	0,02	0,03	-0,02	0,02	0,00	-0,01	0,00	-0,02	-0,02	-0,03	-0,02	-0,03	0,02	0,00	-0,08	1,00	-0,13	-0,02	
EE	-0,42	-0,02	-0,04	0,01	-0,06	0,09	-0,03	-0,02	-0,02	-0,02	-0,01	0,02	-0,01	0,04	-0,01	0,06	0,00	0,00	0,01	0,01	-0,01	0,00	-0,17	-0,13	1,00	-0,04	
FF	-0,52	0,00	0,00	-0,01	0,06	-0,03	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,02	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	0,02	-0,01	-0,01	0,00	-0,02	-0,04	1,00	

Abbildung 6-1: Korrelationsmatrix der Regressionskoeffizienten

Für das gewählte Design sind die Koeffizienten zum größten Teil unkritisch. Die quadratischen Effekte AA, BB, EE und FF überdecken sich leicht mit dem Mittelwert. Das muss bei der Auswertung berücksichtigt werden.

Eine detailliertere Aussage über die Auswertbarkeit erhält man über den Varianzinflationsfaktor (VIF). Er liefert Information darüber, um wieviel sich die Varianz der Koeffizienten im Regressionsmodell durch die fehlende Orthogonalität erhöht. Der Idealwert beträgt 1. Werte über 4 bis 5 werden als kritisch betrachtet. Ab 10 gilt der Faktor als nicht auswertbar. Tabelle 6-2 zeigt die VIF Werte für das gewählte Modell aus Gleichung (6.1). Die Vertrauensbereiche der Koeffizienten hängen von der Versuchsstreuung ab. Sie werden um den Faktor \sqrt{VIF} vergrößert, was das Detektieren von signifikanten Effekten erschwert. Die Werte liegen für alle Faktoren knapp über 1. Hier ist zu erkennen, dass die Korrelation der quadratischen Effekte als unkritisch zu sehen ist. Das gewählte Design ist somit gut für die geforderte Aufgabenstellung geeignet.

Tabelle 6-2: VIF Werte für das Regressionsmodell

Term	VIF
A	1,01
B	1,01
C	1,01
D	1,01
E	1,01
F	1,01
AB	1,01
AC	1,01
AD	1,01
AE	1,01
AF	1,01
BC	1,01
BD	1,01
BE	1,00
BF	1,01
CD	1,01
CE	1,01
CF	1,01
DE	1,01
DF	1,01
EF	1,01
AA	1,06
BB	1,04
EE	1,08
FF	1,01

6.2 ANOVA

Auf eine Berücksichtigung von Blockfaktoren wird verzichtet. Die fehlenden 58 Versuche werden, unter Berücksichtigung von konstanten Umgebungsbedingungen, an einem Tag durchgeführt. Die Ergebnisse befinden sich im Anhang.

Bevor die Koeffizienten des Beschreibungsmodells berechnet werden, erfolgt eine Anpassung des ursprünglich angenommenen Modells. Effekte, welche keine statistische Signifikanz aufweisen, müssen entfernt werden. Sie sind nicht reproduzierbar und treten rein zufällig auf. Die Genauigkeit des Modells wird verschlechtert. Um die Signifikanz der Effekte zu untersuchen, wird die Varianzanalyse eingesetzt (siehe Abschnitt 3.7). Tabelle 6-3 zeigt die Auswertung für das gesamte Modell.

Tabelle 6-3: ANOVA - Tabelle für das angenommene Modell

Variationsquelle	Quadratsumme	df	Mittlere Quadratsumme	F-Wert	p-Wert
Modell	38580,84	25	1543,23	85,11	< 0,0001
A-Belastung	587,55	1	587,55	32,40	< 0,0001
B-Geschwindigkeit	1898,88	1	1898,88	104,72	< 0,0001
C-Spindeldurchmesser	2015,40	1	2015,40	111,15	< 0,0001
D-Spindelsteigung	29714,64	1	29714,64	1638,70	< 0,0001
E-Kin. Viskosität	211,65	1	211,65	11,67	< 0,0001
F-Temperatur	1060,42	1	1060,42	58,48	< 0,0001
AB	16,44	1	16,44	0,91	0,3429
AC	0,50	1	0,50	0,03	0,8687
AD	2,78	1	2,78	0,15	0,6960
AE	5,88	1	5,88	0,32	0,5702
AF	12,46	1	12,46	0,69	0,4087
BC	0,28	1	0,28	0,02	0,9017
BD	1,76	1	1,76	0,10	0,7557
BE	243,50	1	243,50	13,43	0,0004
BF	110,89	1	110,89	6,12	0,0148
CD	1077,71	1	1077,71	59,43	< 0,0001
CE	45,21	1	45,21	2,49	0,1169
CF	176,16	1	176,16	9,72	0,0023
DE	21,87	1	21,87	1,21	0,2743
DF	11,35	1	11,35	0,63	0,4304
EF	205,63	1	205,63	11,34	0,0010
AA	9,24	1	9,24	0,51	0,4768
BB	130,43	1	130,43	7,19	0,0083
EE	15,97	1	15,97	0,88	0,3499
FF	2,87	1	2,87	0,16	0,6913
Fehler	2248,50	124	18,13		
Total	40829,34	149			

Die Spalte „Quadratsumme“ beschreibt die quadrierten Abweichungen vom Gesamtmittelwert, welche durch die jeweiligen Größen verursacht werden. Man unterscheidet zwischen der Quadratsumme zwischen den Gruppen, welche die Variabilität des Modells beschreibt und der Quadratsumme innerhalb der Gruppen. Sie drückt den Rest der Streuung aus und ist hier als Fehler bezeichnet. Die Gesamtvariabilität beträgt 40829,34. Der Großteil davon (38580,84) wird durch das Modell mit 25 Freiheitsgraden (d_f) beschrieben und tritt nicht zufällig auf. Die vom Modell verursachte Streuung wird auf die einzelnen Parameter aufgeteilt. Je höher die Streuung durch jeden einzelnen Parameter,

desto wahrscheinlicher ist dessen Signifikanz. Dividiert man die Spalte „Quadratsumme“ durch die Freiheitsgrade, erhält man die Variabilität je Freiheitsgrad („Mittlere Quadratsumme“).

Mit Gleichung (3.17) können die F-Werte bestimmt werden. Die Versuchsstreuung je Freiheitsgrad beträgt 18,13. Der Wert sinkt mit zunehmender Anzahl an „freien“ Freiheitsgraden. Je genauer man die Varianz bestimmt, desto kleinere Effekte können detektiert werden. Durch Vergleich der F-Werte mit kritischen Werten aus der F-Verteilung werden die p-Werte berechnet. Sie beschreiben die Wahrscheinlichkeit einen F-Wert zu finden, der dieselbe Größe aufweist wie der vorliegende, also das Risiko, bei der Annahme eines signifikanten Effektes falsch zu liegen. Die Signifikanz ergibt sich somit aus

$$\text{Signifikanz} = (1 - p) \cdot 100\% \quad (6.2)$$

Auf dieser Basis folgt die Modellvereinfachung. Ausgehend von jenem mit der geringsten Signifikanz werden schrittweise Parameter aus dem Modell entfernt. Mit jedem verworfenen Parameter steigt die Anzahl der „freien“ Freiheitsgrade und es sinkt die Streuung des Versuchsfehlers. Die Signifikanz für die verbliebenen Faktoren steigt. Dieser Schritt wird wiederholt bis ein endgültiges reduziertes signifikantes Modell vorliegt. Tabelle 6-4 zeigt die Varianzanalyse für dieses Modell. Als Signifikanzschwelle wurde dabei 99% festgelegt. Die Wechselwirkung BF verfehlte diese knapp, wurde daher trotzdem im Modell belassen.

Tabelle 6-4: ANOVA – Tabelle für das reduzierte Modell

Variationsquelle	Quadratsumme	df	Mittlere Quadratsumme	F-Wert	p-Wert
Modell	38435,45	12	3202,95	183,30	< 0,0001
A-Belastung	604,70	1	604,70	34,61	< 0,0001
B-Geschwindigkeit	1906,16	1	1906,16	109,09	< 0,0001
C-Spindeldurchmesser	2027,02	1	2027,02	116,00	< 0,0001
D-Spindelsteigung	29998,45	1	29998,45	1716,79	< 0,0001
E-Kin. Viskosität	221,24	1	221,24	12,66	0,0005
F-Temperatur	1094,97	1	1094,97	62,66	< 0,0001
BE	244,37	1	244,37	13,99	0,0003
BF	109,06	1	109,06	6,24	0,0137
CD	1108,52	1	1108,52	63,44	< 0,0001
CF	172,81	1	172,81	9,89	0,0020
EF	205,17	1	205,17	11,74	0,0008
BB	138,92	1	138,92	7,95	0,0055
Fehler	2393,88	137	17,47		
Total	40829,34	149			

Um die Güte der beiden Modelle zu vergleichen, wird, wie unter Abschnitt 3.8 beschrieben, das Bestimmtheitsmaß R^2 herangezogen. Es erklärt wie groß der durch das Modell beschriebene Anteil der Gesamtvariabilität ist. Da durch die vorgenommenen Parameterelimination die Fehlerstreuung zunimmt (vgl. Tabelle 6-3 und Tabelle 6-4), sinkt das Bestimmtheitsmaß. Aus diesem Grund erfolgt der Vergleich mit Hilfe des adjustierten Bestimmtheitsmaßes R_{adj}^2 , welches die Anzahl der Parameter mitberücksichtigt und diesen Effekt ausgleicht. Tabelle 6-5 zeigt die Gegenüberstellung der beiden Modelle. Es ist zu erkennen, dass trotz der Vereinfachung das reduzierte Modell die Daten besser beschreibt als das vollständige. Eine Anpassung von 93,62% ist sehr zufriedenstellend. Die Regressionsfunktion des reduzierten Modells ist in Abbildung 6-2 dargestellt. Im Gegensatz zum Mittelwertvergleich müssen die Parameter der Funktion bei der Varianzanalyse durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate angepasst werden.

Tabelle 6-5: Gütevergleich der Modelle

Bestimmtheitsmaß	Gesamtmodell	Reduziertes Modell
R^2	0,9449	0,9414
R_{adj}^2	0,9338	0,9362

Wirkungsgrad =
 74,27
 7,25E-003 * Belastung
 -5,25E-002 * Geschwindigkeit
 -3,43E+000 * Spindeldurchmesser
 7,86E-001 * Spindelsteigung
 -7,09E-003 * Kinematische Viskosität
 -2,09E-001 * Temperatur
 -2,66E-005 * Geschwindigkeit * Kinematische Viskosität
 2,09E-004 * Geschwindigkeit * Temperatur
 3,03E-001 * Spindeldurchmesser * Spindelsteigung
 1,53E-002 * Spindeldurchmesser * Temperatur
 1,84E-004 * Kinematische Viskosität * Temperatur
 8,08E-005 * Geschwindigkeit * Geschwindigkeit

Abbildung 6-2: Regressionsmodell des Response Surface Design

6.3 Analyse der Residuen

Das vorliegende Modell beschreibt zwar die gemessenen Daten formal mit guter Genauigkeit, es besitzt jedoch mathematisch noch keine Gültigkeit. Voraussetzung für den Einsatz der Varianzanalyse ist, dass der gesamte Versuchsraum konstante Varianz aufweist. Zudem müssen die Streuungen an den einzelnen Stufenkombinationen unabhängig voneinander und normalverteilt sein. Da man in seltensten Fällen im Vorfeld Informationen über die Daten besitzt, können diese Voraussetzungen nur im Nachhinein überprüft werden.

Eine Möglichkeit ist die Analyse der Residuen. An dieser Stelle sei erwähnt, dass zur Untersuchung auch analytisch mathematische Verfahren existieren. Aus Anwenderseite betrachtet, erweisen sich die Residuenanalysen als anschaulicher und leichter verständlich. Als Residuum wird die Abweichung zwischen dem durch das Modell entstehenden Vorhersagewert und dem getesteten Versuchsergebnis bezeichnet. Sind die Abweichungen rein zufälliger Natur, müssen sie einer Normalverteilung folgen. Der in Abbildung 6-3a dargestellte Normal Plot zeigt dies grafisch für das bestimmte Modell. Es ist zu erkennen, dass die Residuen in der Nähe einer Geraden liegen. Durch den kumulierten Auftrag der relativen Häufigkeit einer Gaußverteilung auf der Ordinate, müssen normalverteilte Daten in diesem Diagramm einer Geraden folgen. Diese Prämisse ist damit untermauert.

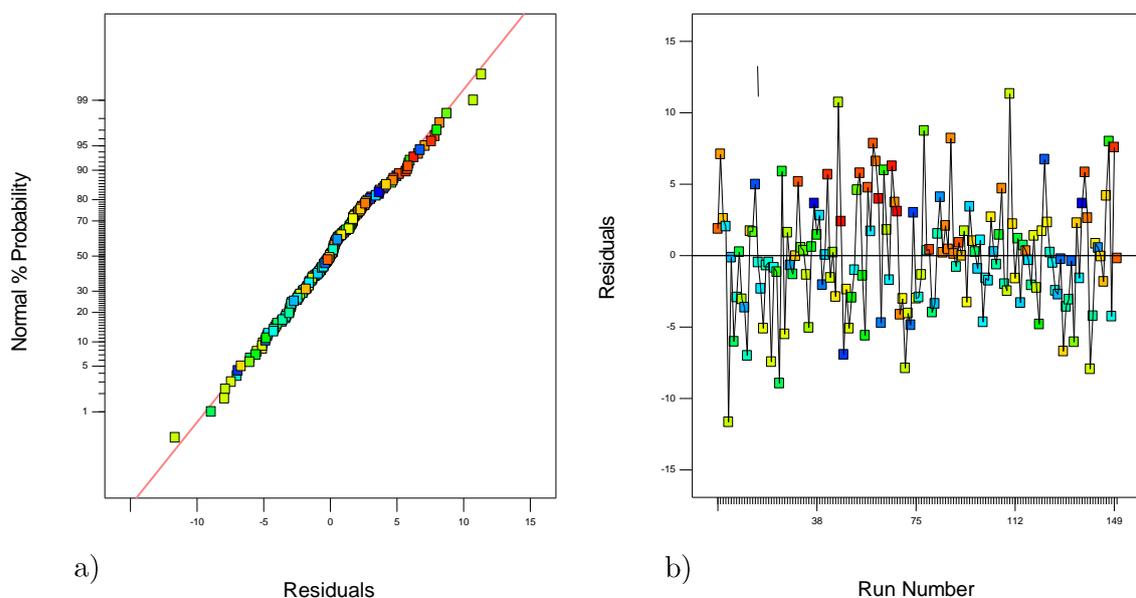


Abbildung 6-3: Normal Plot der Residuen und Residuen über die Versuchsreihenfolge

Zur Überprüfung der Streuungsunabhängigkeit werden die Residuen über die Versuchsreihenfolge aufgetragen (siehe Abbildung 6-3b). Es ist hier zu erwähnen, dass ein

Teil der Versuchsergebnisse aus der Voruntersuchung übernommen wurde. Um einer Systematik vorzubeugen, wurden die Versuche im Design zufällig angeordnet. Abbildung 6-3b zeigt, dass sich die Residuen gleichmäßig über die Versuchsreihenfolge verhalten. Es ist kein Trend erkennbar.

Auch die Varianzhomogenität weist gute Ergebnisse auf. Werden die Fehler über die vorhergesagten Werte aufgetragen, ist zu sehen, dass sich die Varianz über den gesamten Bereich in einem relativ homogenen Band um den Mittelwert anordnet (siehe Abbildung 6-4). Die mathematischen Voraussetzungen für die Anwendung der Varianzanalyse sind somit vollständig erfüllt.

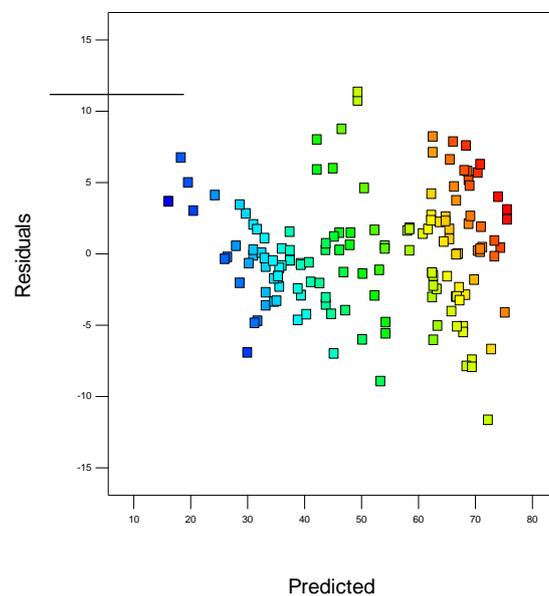


Abbildung 6-4: Residuen über die Vorhersagewerte

6.4 Modellvalidierung

Das ermittelte Modell besitzt nun Gültigkeit und ist für die Erstellung von Wirkungsgradprognosen zulässig. Es stellt sich die Frage, welche Genauigkeit diese Prognosen besitzen. Diese Frage lässt sich mit Hilfe von Konfidenzintervallen beantworten. Man unterscheidet bei Regressionsmodellen zwischen Vertrauens- und Vorhersagebereichen. Vertrauensbereiche beschreiben die Lage des wahren Mittelwertes μ der Grundgesamtheit. Einzelne Werte y streuen um diesen Mittelwert μ . Vorhersagebereiche legen die äußeren Schranken für einzelne Vorhersagewerte fest. Naturgemäß sind Vorhersagebereiche daher breiter als Vertrauensbereiche. Abbildung 6-5 stellt die errechneten Bereiche der drei Wirkungsgradmodelle beispielhaft für den Faktor Belastung (A) grafisch dar. Dabei zeigt

Abbildung 6-5a das vollfaktorielle Design, Abbildung 6-5b das teilfaktorielle Design und Abbildung 6-5c das Response Surface Design. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine zufällige Stichprobe innerhalb der Schranken liegt, wurde mit 95% festgelegt.

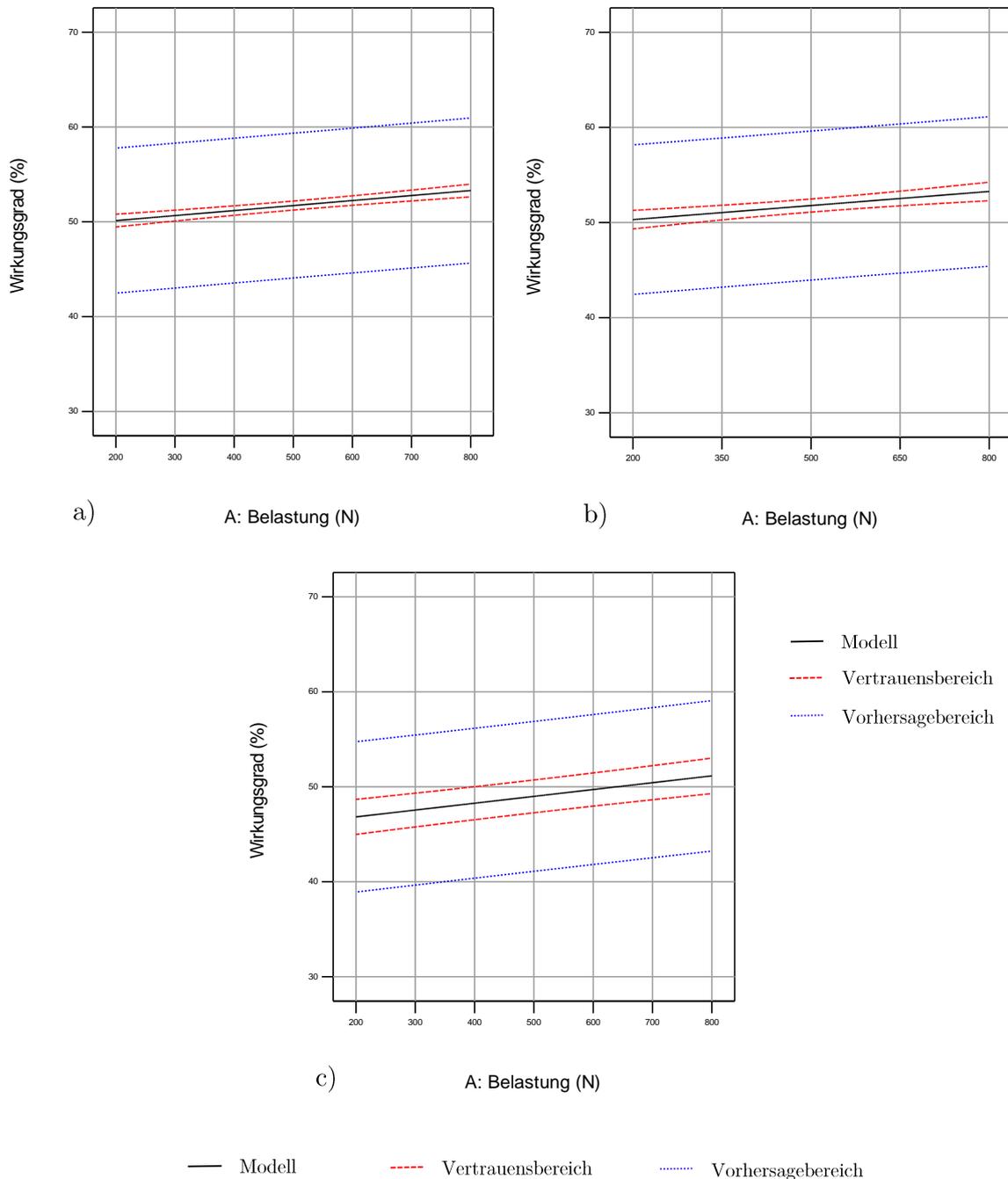


Abbildung 6-5: Vertrauensbereiche und Vorhersagebereiche der drei Beschreibungsmodelle für den Faktor Belastung

Der Abstand der Vorhersageschranken unterscheidet sich bei allen Modellen nur marginal. Durch die hohe Versuchszahl im vollfaktoriellen Design besitzt dieses den engsten Vertrauensbereich. Die Vertrauensbereiche weiten sich am Rand der Versuchsraums auf.

Der Grund ist, dass die Modellparameter, das sind die Steigungen der Geraden, ebenfalls einen Konfidenzintervall besitzen. Das teilfaktorielles Design besitzt durch die kleinere Versuchszahl eine etwas verringerte Genauigkeit.

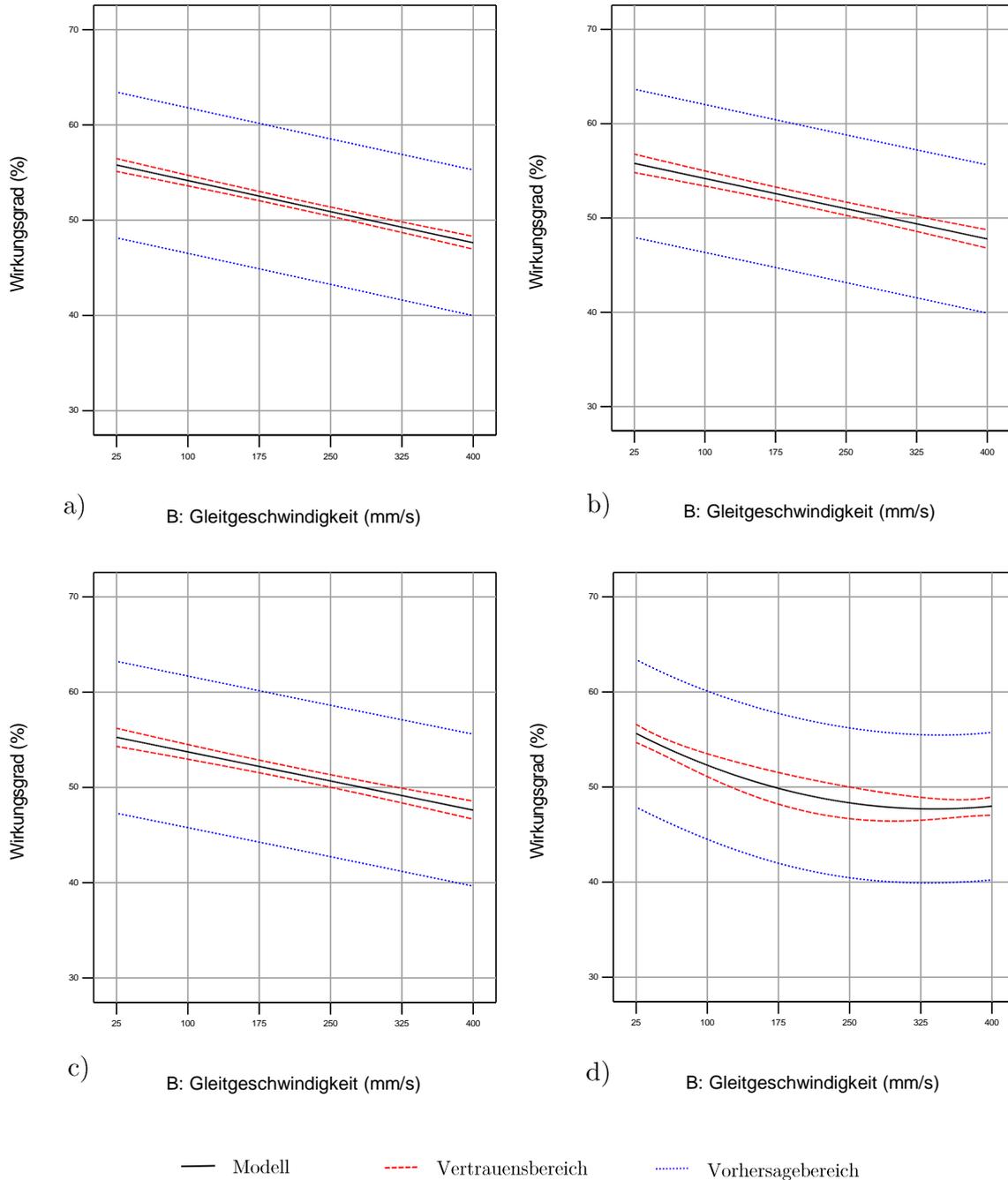


Abbildung 6-6: Vertrauensbereiche und Vorhersagebereiche der drei Beschreibungsmodelle für den Faktor Geschwindigkeit

Beide Designs gehen von einem linearen Zusammenhang aus. Quadratische Einflüsse bleiben unberücksichtigt. Da der Faktor Geschwindigkeit als signifikanter quadratischer Einfluss detektiert wurde, versagen diese Modelle im Zentrum des Versuchsraums. Das Response

Surface Modell berücksichtigt diesen Zusammenhang, wie in Abbildung 6-6d zu erkennen ist. Es sinkt der Gesamtmittelwert des Modells von 51,44% auf 48,99%. Das erklärt den zu erkennenden Offset des quadratischen Modells (Abbildung 6-5c) zu den linearen Modellen (Abbildung 6-5a und Abbildung 6-5b).

Abbildung 6-6c zeigt beispielhaft eine rein lineare Auswertung des Response Surface Design. Die Breite der Konfidenzintervalle ist in diesem Fall dem teilfaktoriellen Modell sehr ähnlich. Durch die zusätzliche Berücksichtigung des quadratischen Einflusses von B weitet sich der Vertrauensbereich aus. Das ist sowohl Abbildung 6-5c als auch Abbildung 6-6d zu entnehmen. Die Breite des Vertrauensbereichs im Zentrum eines Versuchsraums entspricht mathematisch exakt der Varianz des Gesamtmittelwertes. An den Rändern addiert sich zu dieser Streuung, wie oben erwähnt, die Streuung der Modellparameter. Da die Anzahl der Versuchspunkte im Zentrum des Plans im Vergleich zu den Eckpunkten gering ist, kann die Varianz nicht mit derselben Genauigkeit abgeschätzt werden. Diese Variabilität breitet sich über das gesamte Beschreibungsmodell aus.

Die vollfaktorielle Untersuchung bringt zwar formell den kleinsten Vertrauensbereich, durch die Fehlannahme eines linearen Zusammenhangs ist dieser jedoch im Zentrum ungültig. Der Fehler liegt dabei nicht in der Statistik. Diese Erkenntnis zeigt beispielhaft die Wichtigkeit der Versuchsvorbereitung. Falsche Annahmen im Vorfeld können durch Statistik nicht korrigiert werden. Fehlinterpretationen sind vorprogrammiert.

Im Aufwand- / Nutzenvergleich der Modelle kann gesagt werden, dass sich die Methode des D-Optimalen Design bewährt hat. Durch den linearen Modellansatz scheitern die zweistufigen Modelle bei der Prognoseerstellung im Zentrum des Versuchsraums. Hätte die Untersuchung eine Optimierung der Zielgröße zum Vorsatz, hätte eine lineare Analyse ausgereicht. Hier wäre der teilfaktorielle Plan dem vollfaktoriellen aufgrund des halbierten Versuchsaufwands bei ähnlicher Genauigkeit zu bevorzugen.

6.5 Der Verifizierungsversuch

Nach dem formellen Nachweis der Prognosefähigkeit der Beschreibungsmodelle in Abschnitt 6.4 folgt die Überprüfung der Praxisfähigkeit. Dafür wird ein Verifizierungsversuch durchgeführt. Als Proband dient ein in der Serie eingesetztes und bekanntes Spindelsystem. Es unterscheidet sich zu den Prüflingen aus der Versuchsplanung dadurch, dass als

Mutternwerkstoff ein tribologieoptimierter Kunststoff zur Anwendung kommt. Aus Erfahrung weiß man, dass diese Eigenschaft beim gleichzeitigen Einsatz von Schmiermittel kaum Unterschiede im Wirkungsgrad aufwirft. Eine Anwendung des Modells ist somit zulässig. Der eingesetzte Schmiermitteltyp unterscheidet sich ebenfalls zu den Versuchsreihen. Hier zeigt sich der Vorteil der Parameterwahl, der eine Berücksichtigung unterschiedlicher Schmiermitteltypen über die Eigenschaft der kinematischen Viskosität möglich macht. Tabelle 6-6 listet die untersuchten Einstellungen auf.

Tabelle 6-6: Parameter und Prognosebereiche für den Verifizierungsversuch

Modellparameter	Wert	Einheit
Belastung	740	N
Gleitgeschwindigkeit	132	mm/s
Spindeldurchmesser	12,5	mm
Spindelsteigung	5,08	mm
Kinematische Viskosität	160	mm ² /s
Temperatur	25	°C
Wirkungsgradprognose Response Surface Design		
95% PI untere Schranke	45,8	%
Mittelwert	53,7	%
95% PI obere Schranke	61,7	%
Wirkungsgradprognose vollfaktorielles Design		
95% PI untere Schranke	49,0	%
Mittelwert	56,7	%
95% PI obere Schranke	64,3	%
Wirkungsgradprognose teilfaktorielles Design		
95% PI untere Schranke	48,0	%
Mittelwert	56,0	%
95% PI obere Schranke	63,9	%

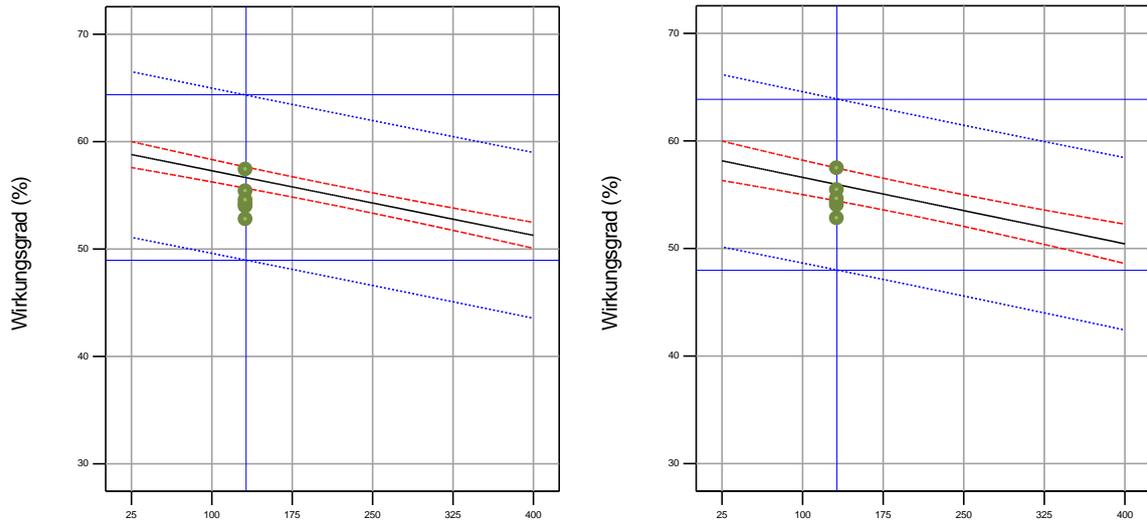
Mit Hilfe des Prognosemodells (siehe Abbildung 6-2) kann eine Schätzung für die Lage des Mittelwertes und den dazugehörigen 95% Vertrauens- und Vorhersagebereichen bestimmt werden. Die errechneten Werte sind in Tabelle 6-6 dargestellt. Vergleichsweise sind die Vorhersagen des voll- und teilfaktoriellen Designs ebenfalls angeführt. PI steht für Prognoseintervall. Mit 95% Wahrscheinlichkeit liegt der Wirkungsgrad einer zufällig

ausgewählten Spindel unter oben beschriebenen Betriebsbedingungen zwischen 45,8% und 61,7%.

Für die praktische Verifizierung werden sechs Prüflinge zufällig ausgewählt und vermessen. Tabelle 6-7 zeigt die Ergebnisse. Der Mittelwert der Messungen liegt 54,5% nahe dem prognostizierten Wert des quadratischen Modells. Im in Abbildung 6-7 gezeigten Vergleich ist die Ungenauigkeit der linearen Modelle im Zentrum des Versuchsraums erkennbar. Wiederholt zeigt Abbildung 6-7a das vollfaktorielle, Abbildung 6-7b das teilfaktorielle und Abbildung 6-7c das Response Surface Design. Abbildung 6-7c lässt eine Verteilung der Messungen um den vorhergesagten Mittelwert erkennen. Die Prognosefähigkeit ist damit praktisch untermauert.

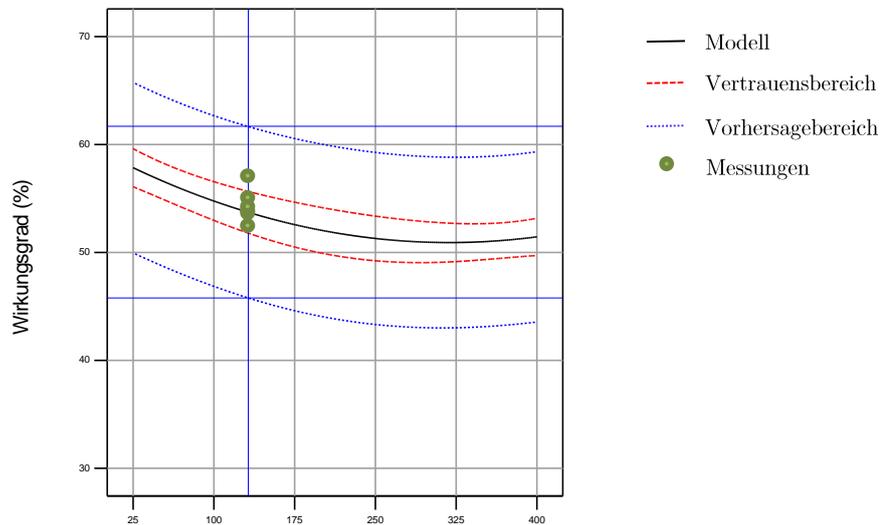
Tabelle 6-7: Messwerte der Vergleichsmessungen

Nr	Hubgeschwindigkeit	Belastung	Reibwert	Wirkungsgrad
-	mm/s	N	-	%
1	18,9	740	0,110	54,9
2	18,9	741	0,116	53,7
3	18,9	774	0,120	52,7
4	18,9	776	0,115	53,8
5	18,8	774	0,112	54,6
6	18,9	777	0,099	57,5
Mittelwert	18,9	763	0,112	54,5



a) B: Gleitgeschwindigkeit (mm/s)

b) B: Gleitgeschwindigkeit (mm/s)



c) B: Gleitgeschwindigkeit (mm/s)

Abbildung 6-7: Vergleich der Messergebnisse mit der Vorhersage der unterschiedlichen Modelle

7 Zusammenfassung

In der Praxis stößt das analytische Berechnungsschema zur Effizienzbestimmung von Gewindespindeln häufig an seine Grenzen. Für eine exakte Vorabbestimmung ist die Kenntnis des Reibwertverhaltens der eingesetzten Spindel-Spindelmuttermutterpaarung notwendig. Da es sich dabei um ein tribologisches System handelt, welches von vielen Faktoren beeinflusst wird, ist dieses Wissen nur in seltenen Fällen vorhanden. Es muss auf Näherungswerte aus der Literatur oder Datenblättern zurückgegriffen werden. Es resultiert der Bedarf nach einer alternativ abgesicherten Vorhersagemöglichkeit. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Beschreibungsmodell entwickelt, das den Wirkungsgrad, in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren, bestimmbar macht.

Um Spindelwirkungsgrade zu quantifizieren wurde im ersten Schritt ein Messprinzip entwickelt und dieses in einem Prüfstands Aufbau praktisch umgesetzt. Der Prüfstand ermöglichte die Vermessung von verschiedenen Spindeldimensionen mit unterschiedlichen Betriebsparametern.

Die Methode der statistischen Versuchsplanung diente zur systematischen Vorbereitung von mehreren Versuchsreihen. Es wurden breitgefächert Parameter, welche Einfluss auf den Wirkungsgrad von Spindelsystemen aufweisen konnten, gesammelt und bewertet. Aus einer durch technische und wirtschaftliche Überlegungen reduzierten Parameterliste wurde ein Untersuchungsumfang von sechs Parametern festgelegt.

Die erste Versuchsreihe bildete der Screeningversuch. Er hatte zum Ziel den Versuchsraum grob zur durchleuchten um ein grundlegendes Verständnis für das System und den Einfluss der Faktoren, sowie deren Wechselwirkungen, zu erhalten. Dabei kam ein vollfaktorieller Versuchsplan mit zwei Stufen je Faktor zum Einsatz. Die Ergebnisse zeigten, dass alle sechs Parameter eine statistisch signifikante Auswirkung auf den Wirkungsgrad aufweisen. Sie wurden zusammen mit den signifikanten Wechselwirkungen in einem linearen Beschreibungsmodell abgebildet.

Als alternative Strategie wurde der Screeningversuch zusätzlich als teilfaktorieller Versuchsplan ausgewertet. Es wurde aufgezeigt, wie sich das gezielte Reduzieren der Versuchszahl auf die Ergebnisgenauigkeit des Beschreibungsmodells auswirkt. Die Signifikanz der Parameter konnte weiterhin nachgewiesen werden. Bei der Bewertung der

Wechselwirkungen kam es durch die verringerte Ergebnisgenauigkeit zu marginalen Differenzierungen, was sich im daraus abgeleiteten Modell widerspiegelt. Im direkten Vergleich zum vollfaktoriellen Design konnte der Versuchsaufwand halbiert werden.

Den Screeningversuchen wurde die Prämisse eines linearen Zusammenhangs zwischen den Parametern und dem Wirkungsgrad unterstellt. Da ein nichtlinearer Einfluss physikalisch nicht für alle Faktoren ausgeschlossen werden konnte, wurde eine weitere Versuchsreihe aufgestellt. Mit Hilfe eines Response Surface Designs sollten vorhandene quadratische Zusammenhänge detektiert und in weiterer Folge im Beschreibungsmodell berücksichtigt werden. Dazu wurden vier von sechs Faktoren um eine dritte Einstellstufe erweitert. Die Versuchsplanauswahl fiel auf ein computergeneriertes D-Optimales Design. Die Analyse zeigte einen signifikanten quadratischen Einfluss des Faktors Gleitgeschwindigkeit. Für die verbleibenden drei Faktoren war der lineare Ansatz ausreichend. Das Modell wurde um einen Term zweiter Ordnung erweitert.

Im Vergleich+ von voll- und teilfaktoriellen Design konnte gesagt werden, dass der zusätzliche Versuchsaufwand keinen großen Erkenntnisgewinn mit sich brachte. Die Vertrauensbereiche der Modelle unterschieden sich nur unerheblich. Im Sinne der Effizienz sind teilfaktorielle Pläne zu bevorzugen, wenn es die Voraussetzungen zulassen.

Die Modelle aus den Screeningversuchen versagten vor allem im Bereich des Versuchsraumzentrums. Grund dafür war das unberücksichtigte nichtlineare Verhalten. Ein Verifizierungsversuch untermauerte diese Erkenntnisse. Das Beschreibungsmodell des Response Surface Design lieferte aussagekräftige Vorhersagen. Es konnte zur Bestimmung von Spindelwirkungsgraden im untersuchten Bereich eingesetzt werden.

Die Spindelwirkungsgrade weisen aufgrund von Ungenauigkeiten in der Fertigung und anderen Unsicherheiten eine technisch relevante Streuung auf. Dies begrenzt die Prognosegenauigkeit des Modells für einzelne Spindeln auf ungefähr $\pm 10\%$ Wirkungsgrad, was bei der Auslegung zukünftiger Spindelssysteme berücksichtigt werden muss. Um diesen Bereich zu verkleinern, sollte daher versucht werden, die Streuung der Spindel zu verringern.

Literaturverzeichnis

- [1] G. Erhard, Konstruieren mit Kunststoffen, München: Carl Hanser Verlag, 4. Auflage, 2008.
- [2] L. Fahrmeir, T. Kneib und S. Lang, Regression: Modelle, Methoden und Anwendungen, München, Innsbruck: Springer Verlag, 2. Auflage, 2009.
- [3] A. Frank, „<http://www.tqu-group.com>,“ 2014. [Online]. Available: http://tqu-group.com/vorlesungen/VorlFrank/HS_3-08%20DoE-Leitfaden.pdf. [Zugriff am 22 09 2014].
- [4] B. Giger, „<http://www.tqu-group.com>,“ 06 2014. [Online]. Available: <http://www.tqu-group.com/downloads/doedownload.pdf>. [Zugriff am 15 09 2014].
- [5] H. Haberhauer und B. Ferdinand, Maschinenelemente: Gestaltung, Berechnung, Anwendung, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 17. bearbeitete Auflage, 2014.
- [6] K. Kabus, Decker: Maschinenelemente Funktion, Gestaltung und Berechnung, Wien: Carl Hanser Verlag, 15. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, 2004.
- [7] B. Klein, Versuchsplanung - DoE: Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 3. Auflage, 2011.
- [8] W. Kleppmann, Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren, Aalen: Carl Hanser Verlag, 8. Auflage, 2013.
- [9] J. Krottmaier, Versuchsplanung - Der Weg zur Qualität des Jahres 2000, Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1990.
- [10] E. Kuhn, Zur Tribologie der Schmierfette: Eine energetische Betrachtungsweise des Reibungs- und Verschleißprozesses, Renningen: expert verlag, 2009.

- [11] B. Künne, Köhler/Rögnitz Maschinenteile 1, Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2007.
- [12] v. d. P. Lippe, Deskriptive Statistik, Stuttgart, Jena: Gustav Fischer Verlag, 1993.
- [13] D. Meintrup, „<http://de.saswiki.org/wiki/Hauptseite>,“ 2014. [Online]. Available: http://de.saswiki.org/images/d/d6/16._KSFE_2012_-_Meintrup_-_Statistische_Versuchsplanung_mit_JMP_-_von_der_Klassik_zur_Moderne.pdf. [Zugriff am 09 18 2014].
- [14] G. Niemann, H. Winter und B.-R. Höhn, Maschinenelemente Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen, München: Springer-Verlag, 4. bearbeitete Auflage, 2005.
- [15] A. Orth und D. Wenzel, „Modellgestützte Versuchsplanung und Optimierung in ihrer Anwendung,“ Umesoft GmbH, 2014. [Online]. Available: <http://www.versuchsplanung.com>. [Zugriff am 18 09 2014].
- [16] C. U. Ronninger, „<http://www.crgraph.de>,“ 2014. [Online]. Available: <http://www.crgraph.de/Orthogonal.pdf>. [Zugriff am 18 09 2014].
- [17] G. Schöllhammer, „Entwicklung und Untersuchung inverser Wellendichtsysteme,“ Stuttgart, 2004.
- [18] K. Siebertz, D. van Bebber und T. Hochkirchen, Statistische Versuchsplanung, Aachen: Springer Verlag, 2010.
- [19] W. Steinhilper und B. Sauer, Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1, Kaiserslautern: Springer Verlag, 2012.
- [20] Verein Deutscher Ingenieure, VDI 2158: Selbsthemmende und selbstbremsende Getriebe, Düsseldorf: VDI-Richtlinien, 1991.

-
- [21] H. Wittel, D. Muhs, D. Jannasch und J. Voßiek, Roloff / Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung, Wiesbaden: Vieweg + Teubner GWV Fachverlage GmbH, 19. überarbeitete und erweiterte Auflage, 2009.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Linearantrieb mit Spindelsystem.....	1
Abbildung 2-1: Schraubenlinie und Abwicklung eines eingängigen Gewindes	6
Abbildung 2-2: Schraubenlinie und Abwicklung eines mehrgängigen Gewindes.....	7
Abbildung 2-3: Der Reibwinkel ρ	8
Abbildung 2-4: Kräftesituation am vereinfachten Gewinde	9
Abbildung 2-5: Kraftsituation am Mutternelement im reibungsfreien Fall	10
Abbildung 2-6: (a) Kraftsituation am Mutternelement für einen Hubvorgang für ein nicht selbsthemmendes Gewinde, (b) Kraftsituation am Mutternelement für einen Senkvorgang für ein nicht selbsthemmendes Gewinde.....	11
Abbildung 2-7: Kraftsituation am Mutternelement für einen Senkvorgang für ein selbsthemmendes Gewinde	11
Abbildung 2-8: Der Flankenwinkel α	12
Abbildung 2-9: Mutternelement am Gewindekeil	13
Abbildung 2-10: Gewindewirkungsgrad beim Heben und Senken für $\mu=0,08$	15
Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des untersuchten Systems.....	22
Abbildung 3-2: Einteilung der Parameter lt. G. Taguchi.....	23
Abbildung 3-3: Effekte des Faktors A auf eine Zielgröße.....	25
Abbildung 3-4: Schematische Darstellung der Zweifachwechselwirkung zwischen den Faktoren A und B.....	26
Abbildung 3-5: Symbolische Darstellung der Orthogonalität eines Versuchsplans	27
Abbildung 3-6: Symbolische Darstellung der Ausgewogenheit eines Versuchsplans	28
Abbildung 3-7: Auswahl klassischer Versuchspläne	29
Abbildung 3-8: Versuchsplan mit 3 Faktoren auf 2 Stufen inkl. Center Point.....	32
Abbildung 3-9: Auswirkungen des Stufenabstands auf die Effekterkennung	33
Abbildung 3-10: Effekt der Randomisierung.....	37

Abbildung 3-11: Vollfaktorieller 2^2 und 2^3 Plan.....	39
Abbildung 4-1: Modell des Prüfaufbaus und Freischnitt des Spindel­systems.....	48
Abbildung 4-2: Prüfaufbau (Antriebseinheit)	49
Abbildung 4-3: Prüfaufbau (Spindelaufnahme)	50
Abbildung 5-1: Ishikawadiagramm	53
Abbildung 5-2: Effektplots der Haupteffekte des 2^6 Designs	65
Abbildung 5-3: Ergebnisse der Tribologieuntersuchung (PCCL Leoben, 2014).....	67
Abbildung 5-4: Effektplots der Zweifachwechselwirkungen des 2^6 Designs.....	68
Abbildung 5-5: Regressionsmodell des Screeningversuchs	69
Abbildung 5-6: Teilfaktorielle Pläne für 6 Faktoren auf 2 Stufen	72
Abbildung 5-7: Regressionsmodell des teilfaktoriellen Screeningversuchs.....	75
Abbildung 6-1: Korrelationsmatrix der Regressionskoeffizienten	78
Abbildung 6-2: Regressionsmodell des Response Surface Design.....	82
Abbildung 6-3: Normal Plot der Residuen und Residuen über die Versuchsreihenfolge....	83
Abbildung 6-4: Residuen über die Vorhersagewerte.....	84
Abbildung 6-5: Vertrauensbereiche und Vorhersagebereiche der drei Beschreibungsmodelle für den Faktor Belastung.....	85
Abbildung 6-6: Vertrauensbereiche und Vorhersagebereiche der drei Beschreibungsmodelle für den Faktor Geschwindigkeit	86
Abbildung 6-7: Vergleich der Messergebnisse mit der Vorhersage der unterschiedlichen Modelle	90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Vollfaktorieller Versuchsplan mit drei Faktoren auf zwei Stufen.....	34
Tabelle 3-2: Versuchsplan mit zwei Realisierungen	35
Tabelle 3-3: Schematische Darstellung der Blockbildung.....	36
Tabelle 3-4: Randomisierte Reihenfolge.....	37
Tabelle 3-5: Vergleich lineares und quadratisches Modell.....	41
Tabelle 4-1: Verwendete Messmittel.....	49
Tabelle 5-1: Bewertung der Faktoren	54
Tabelle 5-2: Faktorstufen des Screeningversuchs	56
Tabelle 5-3: Einstellstufen der Hubgeschwindigkeiten für die Versuchsdurchführung	57
Tabelle 5-4: Messergebnisse des Vorversuchs zur Ermittlung der Standardabweichung....	59
Tabelle 5-5: Ergebnisse des Screeningversuchs	61
Tabelle 5-6: Vergleich der vier Realisierungen.....	62
Tabelle 5-7: Nomenklatur der Faktoren	63
Tabelle 5-8: Regressionskoeffizienten des Screeningversuchs.....	69
Tabelle 5-9: Anzahl der Effekte in Abhängigkeit der Faktoranzahl	71
Tabelle 5-10: Auflösung von Versuchsplänen.....	71
Tabelle 5-11: Vermengungsstruktur des 2^{6-1} Designs	73
Tabelle 5-12: Ergebnisse der Screeningversuchs mit teilfaktoriellem Versuchsplan	74
Tabelle 6-1: Faktorstufen des Response Surface Design.....	77
Tabelle 6-2: VIF Werte für das Regressionsmodell.....	79
Tabelle 6-3: ANOVA - Tabelle für das angenommene Modell	80
Tabelle 6-4: ANOVA – Tabelle für das reduzierte Modell.....	81
Tabelle 6-5: Gütevergleich der Modelle	82
Tabelle 6-6: Parameter und Prognosebereiche für den Verifizierungsversuch.....	88

Tabelle 6-7: Messwerte der Vergleichsmessungen	89
--	----

Anhang

Anhang 1: t-Werte zur Berechnung zweiseitiger Vertrauensbereiche.....	101
Anhang 2: Vollständiger Screeningversuchsplan	102
Anhang 3: Ergebnisse des Screeningversuchsplans mit Blockfaktoren	106
Anhang 4: Produktkenndaten der verwendeten Schmierfette.....	107
Anhang 5: Teilfaktorieller Screeningversuchsplan.....	108
Anhang 6: D-Optimaler Versuchsplan.....	110

Anhang 1: t-Werte zur Berechnung zweiseitiger Vertrauensbereiche

Freiheits- grad f	t-Werte für Vertrauensniveau		
	95 %	99 %	99,9 %
1	12,71	63,66	636,62
2	4,303	9,925	31,60
3	3,182	5,841	12,92
4	2,776	4,604	8,610
5	2,571	4,032	6,869
6	2,447	3,707	5,959
7	2,365	3,499	5,408
8	2,306	3,355	5,041
9	2,262	3,250	4,781
10	2,228	3,169	4,587
12	2,179	3,055	4,318
15	2,131	2,947	4,073
20	2,086	2,845	3,850
30	2,042	2,750	3,646
40	2,021	2,704	3,551
50	2,009	2,678	3,496
70	1,994	2,648	3,435
100	1,984	2,626	3,390
1000	1,962	2,581	3,300
∞	1,960	2,576	3,291

Anhang 2: Vollständiger Screeningversuchsplan

Nr. [-]	Block [-]	Run [-]	Load [N]	Velocity [mm/s]	Diameter [mm]	Lead [mm]	Viscosity [mm ² /s]	Temperature [°C]	Efficiency [%]
8	Block 1	1	800	400	16	2	150	20	26,5
39	Block 1	2	200	400	16	2	150	70	32,6
54	Block 1	3	800	25	16	2	730	70	38,3
45	Block 1	4	200	25	16	8	150	70	62,2
7	Block 1	5	200	400	16	2	150	20	29,2
40	Block 1	6	800	400	16	2	150	70	37,1
23	Block 1	7	200	400	16	2	730	20	19,0
43	Block 1	8	200	400	10	8	150	70	64,7
64	Block 1	9	800	400	16	8	730	70	67,0
46	Block 1	10	800	25	16	8	150	70	65,0
6	Block 1	11	800	25	16	2	150	20	33,4
25	Block 1	12	200	25	10	8	730	20	69,7
48	Block 1	13	800	400	16	8	150	70	65,4
28	Block 1	14	800	400	10	8	730	20	61,8
56	Block 1	15	800	400	16	2	730	70	29,6
49	Block 1	16	200	25	10	2	730	70	48,6
17	Block 1	17	200	25	10	2	730	20	42,8
55	Block 1	18	200	400	16	2	730	70	28,5
30	Block 1	19	800	25	16	8	730	20	61,7
24	Block 1	20	800	400	16	2	730	20	25,1
29	Block 1	21	200	25	16	8	730	20	61,0
9	Block 1	22	200	25	10	8	150	20	74,3
34	Block 1	23	800	25	10	2	150	70	60,9
37	Block 1	24	200	25	16	2	150	70	34,5
16	Block 1	25	800	400	16	8	150	20	58,6
42	Block 1	26	800	25	10	8	150	70	64,2
57	Block 1	27	200	25	10	8	730	70	71,0
61	Block 1	28	200	25	16	8	730	70	71,3
3	Block 1	29	200	400	10	2	150	20	39,8
36	Block 1	30	800	400	10	2	150	70	54,2
2	Block 1	31	800	25	10	2	150	20	60,2
26	Block 1	32	800	25	10	8	730	20	73,5
33	Block 1	33	200	25	10	2	150	70	51,6
31	Block 1	34	200	400	16	8	730	20	41,8
59	Block 1	35	200	400	10	8	730	70	64,3
60	Block 1	36	800	400	10	8	730	70	63,7
32	Block 1	37	800	400	16	8	730	20	49,6
62	Block 1	38	800	25	16	8	730	70	77,1
18	Block 1	39	800	25	10	2	730	20	47,6
15	Block 1	40	200	400	16	8	150	20	61,7
13	Block 1	41	200	25	16	8	150	20	66,8
20	Block 1	42	800	400	10	2	730	20	35,7
51	Block 1	43	200	400	10	2	730	70	38,7
19	Block 1	44	200	400	10	2	730	20	28,6
53	Block 1	45	200	25	16	2	730	70	37,7
63	Block 1	46	200	400	16	8	730	70	56,6
44	Block 1	47	800	400	10	8	150	70	62,9
4	Block 1	48	800	400	10	2	150	20	40,2
10	Block 1	49	800	25	10	8	150	20	73,2
12	Block 1	50	800	400	10	8	150	20	65,9
41	Block 1	51	200	25	10	8	150	70	62,8
58	Block 1	52	800	25	10	8	730	70	71,3
14	Block 1	53	800	25	16	8	150	20	70,4
50	Block 1	54	800	25	10	2	730	70	57,2
21	Block 1	55	200	25	16	2	730	20	31,9
47	Block 1	56	200	400	16	8	150	70	65,9
35	Block 1	57	200	400	10	2	150	70	48,1
22	Block 1	58	800	25	16	2	730	20	32,7
52	Block 1	59	800	400	10	2	730	70	48,0
27	Block 1	60	200	400	10	8	730	20	54,5
1	Block 1	61	200	25	10	2	150	20	44,3
5	Block 1	62	200	25	16	2	150	20	32,5
11	Block 1	63	200	400	10	8	150	20	65,0
38	Block 1	64	800	25	16	2	150	70	36,4

Nr. [-]	Block [-]	Run [-]	Load [N]	Velocity [mm/s]	Diameter [mm]	Lead [mm]	Viscosity [mm ² /s]	Temperature [°C]	Efficiency [%]
209	Block 4	65	200	25	10	2	730	20	43,6
238	Block 4	66	800	25	16	8	150	70	66,6
214	Block 4	67	800	25	16	2	730	20	31,9
221	Block 4	68	200	25	16	8	730	20	58,5
215	Block 4	69	200	400	16	2	730	20	19,8
253	Block 4	70	200	25	16	8	730	70	73,5
198	Block 4	71	800	25	16	2	150	20	35,8
196	Block 4	72	800	400	10	2	150	20	43,0
205	Block 4	73	200	25	16	8	150	20	68,0
200	Block 4	74	800	400	16	2	150	20	26,8
210	Block 4	75	800	25	10	2	730	20	51,0
199	Block 4	76	200	400	16	2	150	20	28,9
223	Block 4	77	200	400	16	8	730	20	41,9
207	Block 4	78	200	400	16	8	150	20	59,1
251	Block 4	79	200	400	10	8	730	70	64,5
203	Block 4	80	200	400	10	8	150	20	63,6
248	Block 4	81	800	400	16	2	730	70	34,9
228	Block 4	82	800	400	10	2	150	70	53,0
222	Block 4	83	800	25	16	8	730	20	63,8
250	Block 4	84	800	25	10	8	730	70	70,6
243	Block 4	85	200	400	10	2	730	70	38,6
216	Block 4	86	800	400	16	2	730	20	24,8
195	Block 4	87	200	400	10	2	150	20	34,8
240	Block 4	88	800	400	16	8	150	70	69,2
204	Block 4	89	800	400	10	8	150	20	67,5
208	Block 4	90	800	400	16	8	150	20	60,8
201	Block 4	91	200	25	10	8	150	20	73,2
206	Block 4	92	800	25	16	8	150	20	72,3
247	Block 4	93	200	400	16	2	730	70	31,6
239	Block 4	94	200	400	16	8	150	70	66,5
194	Block 4	95	800	25	10	2	150	20	57,2
254	Block 4	96	800	25	16	8	730	70	78,7
256	Block 4	97	800	400	16	8	730	70	64,2
230	Block 4	98	800	25	16	2	150	70	33,1
236	Block 4	99	800	400	10	8	150	70	61,5
235	Block 4	100	200	400	10	8	150	70	62,0
220	Block 4	101	800	400	10	8	730	20	60,6
211	Block 4	102	200	400	10	2	730	20	26,4
197	Block 4	103	200	25	16	2	150	20	32,5
231	Block 4	104	200	400	16	2	150	70	32,7
193	Block 4	105	200	25	10	2	150	20	51,3
246	Block 4	106	800	25	16	2	730	70	40,4
219	Block 4	107	200	400	10	8	730	20	55,9
244	Block 4	108	800	400	10	2	730	70	43,8
212	Block 4	109	800	400	10	2	730	20	34,6
249	Block 4	110	200	25	10	8	730	70	72,1
234	Block 4	111	800	25	10	8	150	70	58,7
227	Block 4	112	200	400	10	2	150	70	52,2
242	Block 4	113	800	25	10	2	730	70	54,0
217	Block 4	114	200	25	10	8	730	20	71,8
241	Block 4	115	200	25	10	2	730	70	48,3
226	Block 4	116	800	25	10	2	150	70	60,9
213	Block 4	117	200	25	16	2	730	20	33,3
232	Block 4	118	800	400	16	2	150	70	34,5
252	Block 4	119	800	400	10	8	730	70	64,3
237	Block 4	120	200	25	16	8	150	70	67,1
233	Block 4	121	200	25	10	8	150	70	61,7
255	Block 4	122	200	400	16	8	730	70	60,4
202	Block 4	123	800	25	10	8	150	20	73,1
225	Block 4	124	200	25	10	2	150	70	52,1
229	Block 4	125	200	25	16	2	150	70	33,6
224	Block 4	126	800	400	16	8	730	20	46,9
218	Block 4	127	800	25	10	8	730	20	72,1
245	Block 4	128	200	25	16	2	730	70	35,8

Nr. [-]	Block [-]	Run [-]	Load [N]	Velocity [mm/s]	Diameter [mm]	Lead [mm]	Viscosity [mm ² /s]	Temperature [°C]	Efficiency [%]
161	Block 3	129	200	25	10	2	150	70	52,0
133	Block 3	130	200	25	16	2	150	20	30,9
190	Block 3	131	800	25	16	8	730	70	78,0
157	Block 3	132	200	25	16	8	730	20	59,6
178	Block 3	133	800	25	10	2	730	70	49,4
158	Block 3	134	800	25	16	8	730	20	61,7
179	Block 3	135	200	400	10	2	730	70	39,5
180	Block 3	136	800	400	10	2	730	70	43,1
192	Block 3	137	800	400	16	8	730	70	68,4
152	Block 3	138	800	400	16	2	730	20	22,2
142	Block 3	139	800	25	16	8	150	20	72,3
147	Block 3	140	200	400	10	2	730	20	26,4
185	Block 3	141	200	25	10	8	730	70	70,9
129	Block 3	142	200	25	10	2	150	20	47,6
154	Block 3	143	800	25	10	8	730	20	71,9
137	Block 3	144	200	25	10	8	150	20	72,4
174	Block 3	145	800	25	16	8	150	70	67,6
153	Block 3	146	200	25	10	8	730	20	69,0
183	Block 3	147	200	400	16	2	730	70	28,0
149	Block 3	148	200	25	16	2	730	20	31,0
132	Block 3	149	800	400	10	2	150	20	40,7
176	Block 3	150	800	400	16	8	150	70	65,3
162	Block 3	151	800	25	10	2	150	70	60,7
156	Block 3	152	800	400	10	8	730	20	60,2
148	Block 3	153	800	400	10	2	730	20	33,3
138	Block 3	154	800	25	10	8	150	20	74,3
150	Block 3	155	800	25	16	2	730	20	37,3
186	Block 3	156	800	25	10	8	730	70	71,6
155	Block 3	157	200	400	10	8	730	20	51,1
143	Block 3	158	200	400	16	8	150	20	61,0
163	Block 3	159	200	400	10	2	150	70	44,5
172	Block 3	160	800	400	10	8	150	70	62,0
170	Block 3	161	800	25	10	8	150	70	60,1
187	Block 3	162	200	400	10	8	730	70	63,4
141	Block 3	163	200	25	16	8	150	20	67,1
131	Block 3	164	200	400	10	2	150	20	35,8
140	Block 3	165	800	400	10	8	150	20	66,8
167	Block 3	166	200	400	16	2	150	70	36,2
189	Block 3	167	200	25	16	8	730	70	70,7
168	Block 3	168	800	400	16	2	150	70	36,4
171	Block 3	169	200	400	10	8	150	70	63,0
181	Block 3	170	200	25	16	2	730	70	37,0
164	Block 3	171	800	400	10	2	150	70	60,0
145	Block 3	172	200	25	10	2	730	20	46,6
135	Block 3	173	200	400	16	2	150	20	27,7
166	Block 3	174	800	25	16	2	150	70	36,0
169	Block 3	175	200	25	10	8	150	70	63,4
188	Block 3	176	800	400	10	8	730	70	62,6
146	Block 3	177	800	25	10	2	730	20	51,3
173	Block 3	178	200	25	16	8	150	70	65,9
191	Block 3	179	200	400	16	8	730	70	61,1
136	Block 3	180	800	400	16	2	150	20	26,3
139	Block 3	181	200	400	10	8	150	20	67,8
182	Block 3	182	800	25	16	2	730	70	39,9
151	Block 3	183	200	400	16	2	730	20	19,8
177	Block 3	184	200	25	10	2	730	70	48,8
144	Block 3	185	800	400	16	8	150	20	60,2
134	Block 3	186	800	25	16	2	150	20	32,7
184	Block 3	187	800	400	16	2	730	70	30,5
160	Block 3	188	800	400	16	8	730	20	49,5
175	Block 3	189	200	400	16	8	150	70	68,6
130	Block 3	190	800	25	10	2	150	20	54,1
159	Block 3	191	200	400	16	8	730	20	39,5
165	Block 3	192	200	25	16	2	150	70	33,6

Nr. [-]	Block [-]	Run [-]	Load [N]	Velocity [mm/s]	Diameter [mm]	Lead [mm]	Viscosity [mm ² /s]	Temperature [°C]	Efficiency [%]
101	Block 2	193	200	25	16	2	150	70	34,2
120	Block 2	194	800	400	16	2	730	70	32,3
112	Block 2	195	800	400	16	8	150	70	72,3
100	Block 2	196	800	400	10	2	150	70	54,1
107	Block 2	197	200	400	10	8	150	70	64,2
128	Block 2	198	800	400	16	8	730	70	68,5
70	Block 2	199	800	25	16	2	150	20	33,1
82	Block 2	200	800	25	10	2	730	20	48,4
125	Block 2	201	200	25	16	8	730	70	71,2
77	Block 2	202	200	25	16	8	150	20	67,4
85	Block 2	203	200	25	16	2	730	20	32,2
119	Block 2	204	200	400	16	2	730	70	26,4
91	Block 2	205	200	400	10	8	730	20	54,7
121	Block 2	206	200	25	10	8	730	70	71,2
89	Block 2	207	200	25	10	8	730	20	71,3
127	Block 2	208	200	400	16	8	730	70	61,1
118	Block 2	209	800	25	16	2	730	70	39,8
106	Block 2	210	800	25	10	8	150	70	59,7
114	Block 2	211	800	25	10	2	730	70	44,8
88	Block 2	212	800	400	16	2	730	20	22,1
105	Block 2	213	200	25	10	8	150	70	62,4
78	Block 2	214	800	25	16	8	150	20	72,3
117	Block 2	215	200	25	16	2	730	70	37,0
80	Block 2	216	800	400	16	8	150	20	64,8
113	Block 2	217	200	25	10	2	730	70	48,7
122	Block 2	218	800	25	10	8	730	70	71,1
76	Block 2	219	800	400	10	8	150	20	66,1
109	Block 2	220	200	25	16	8	150	70	66,4
110	Block 2	221	800	25	16	8	150	70	69,8
66	Block 2	222	800	25	10	2	150	20	48,9
97	Block 2	223	200	25	10	2	150	70	48,3
84	Block 2	224	800	400	10	2	730	20	30,8
67	Block 2	225	200	400	10	2	150	20	35,5
123	Block 2	226	200	400	10	8	730	70	66,2
81	Block 2	227	200	25	10	2	730	20	45,2
99	Block 2	228	200	400	10	2	150	70	50,2
126	Block 2	229	800	25	16	8	730	70	80,2
65	Block 2	230	200	25	10	2	150	20	46,4
124	Block 2	231	800	400	10	8	730	70	63,7
90	Block 2	232	800	25	10	8	730	20	73,9
102	Block 2	233	800	25	16	2	150	70	34,2
86	Block 2	234	800	25	16	2	730	20	34,1
116	Block 2	235	800	400	10	2	730	70	41,2
79	Block 2	236	200	400	16	8	150	20	56,9
96	Block 2	237	800	400	16	8	730	20	48,7
83	Block 2	238	200	400	10	2	730	20	24,1
108	Block 2	239	800	400	10	8	150	70	60,2
92	Block 2	240	800	400	10	8	730	20	58,5
72	Block 2	241	800	400	16	2	150	20	27,0
75	Block 2	242	200	400	10	8	150	20	66,5
71	Block 2	243	200	400	16	2	150	20	27,8
94	Block 2	244	800	25	16	8	730	20	62,3
111	Block 2	245	200	400	16	8	150	70	67,2
98	Block 2	246	800	25	10	2	150	70	60,1
69	Block 2	247	200	25	16	2	150	20	29,2
104	Block 2	248	800	400	16	2	150	70	35,2
95	Block 2	249	200	400	16	8	730	20	41,8
73	Block 2	250	200	25	10	8	150	20	75,4
87	Block 2	251	200	400	16	2	730	20	20,8
115	Block 2	252	200	400	10	2	730	70	38,5
103	Block 2	253	200	400	16	2	150	70	32,2
68	Block 2	254	800	400	10	2	150	20	37,3
93	Block 2	255	200	25	16	8	730	20	58,5
74	Block 2	256	800	25	10	8	150	20	76,6

Anhang 4: Produktkenndaten der verwendeten Schmierfette

Produktkenndaten	POLYLUB GLY 801	POLYLUB GLY 501	POLYLUB GLY 151	POLYLUB GLY 151 Spray
Artikel-Nr.	020199	020285	020235	081297
Chemischer Aufbau, Ölart	Mineralöl	Mineralöl	Mineralöl	Mineralöl
Chemischer Aufbau, Ölart	Synt.KW-Öl	Synt.KW-Öl	Synt.KW-Öl	Synt.KW-Öl
Chemischer Aufbau, Konsistenzgeber	Li-Spezial-Seife	Li-Spezial-Seife	Li-Spezial-Seife	Li-Spezial-Seife
Chemischer Aufbau	UV-Additiv			
untere Gebrauchstemperatur	-40 °C / -40 °F	-40 °C / -40 °F	-50 °C / -58 °F	ca. -50 °C / -58 °F
obere Gebrauchstemperatur	130 °C / 266 °F	150 °C / 302 °F	150 °C / 302 °F	150 °C / 302 °F
Farbraum	beige	beige	beige	beige
Dichte bei 20°C	ca. 0,88 g/cm ³	ca. 0,88 g/cm ³	ca. 0,85 g/cm ³	ca. 0,85 g/cm ³
NLGI-Klasse, DIN 51818	1	1	1	
Walkpenetration, DIN ISO 2137, 25°C, unterer Grenzwert	310 x 0,1 mm	310 x 0,1 mm	310 x 0,1 mm	310 x 0,1 mm
Walkpenetration, DIN ISO 2137, 25°C, oberer Grenzwert	340 x 0,1 mm	340 x 0,1 mm	340 x 0,1 mm	340 x 0,1 mm
Scherviskosität bei 25°C, Schergefälle 300 s ⁻¹ , Gerät:Rotationsviskosimeter, unterer Grenzwert	4 000 mPas	3 000 mPas	1 800 mPas	1 800 mPas
Scherviskosität bei 25°C, Schergefälle 300 s ⁻¹ , Gerät:Rotationsviskosimeter, oberer Grenzwert	8 000 mPas	5 000 mPas	3 000 mPas	3 000 mPas
Kinematische Viskosität des Grundöls, DIN 51562 T01/ASTM D-445/ASTM D 7042, 40°C	ca. 730 mm ² /s	ca. 500 mm ² /s	ca. 150 mm ² /s	ca. 150 mm ² /s
Kinematische Viskosität des Grundöls, DIN 51562 T01/ASTM D-445/ASTM D 7042, 100°C	ca. 60 mm ² /s	ca. 40 mm ² /s	ca. 18,5 mm ² /s	ca. 18,5 mm ² /s
Korrosions-Schutzwirkung von Schmierfetten, DIN 51802, (SKF-EMCOR). Prüfdauer: 1 Woche, aqua dest.	<= 1 Korrosionsgrad	<= 1 Korrosionsgrad	<= 1 Korrosionsgrad	<= 1 Korrosionsgrad
Ölabscheidung, ASTM D 6184, nach 30h/100°C	<= 4 Gew. %	<= 4 Gew. %	<= 6 Gew. %	<= 6 Gew. %
Tropfpunkt, DIN ISO 2176	>= 250 °C	>= 250 °C	>= 250 °C	>= 250 °C
Oxidations-Stabilität von Schmierfetten, ASTM D942, 100h/99°C, Druckabfall	<= 0,3 bar	<= 0,3 bar	<= 0,3 bar	<= 0,3 bar
Wasserbeständigkeit, DIN 51807 T01, 3h/90°C, Bewertungsstufe	<= 1 - 90	<= 1 - 90	<= 1 - 90	1 - 90
Mindestlagerdauer ab Herstellung - bei Lagerung in trockenen, frostfreien Räumen und original verschlossenen Gebinden ca.	36 Monate	36 Monate	36 Monate	24 Monate

Anhang 5: Teilfaktorieller Screeningversuchsplan

Run [-]	Load [N]	Velocity [mm/s]	Diameter [mm]	Lead [mm]	Viscosity [mm ² /s]	Temperature [°C]	Efficiency [%]
1	200	400	16	8	150	70	65,9
2	800	25	16	2	730	70	38,3
3	800	400	16	8	150	20	58,6
4	800	25	10	8	150	20	73,2
5	200	25	16	8	730	70	71,3
6	200	400	10	2	150	70	48,1
7	800	25	16	8	730	20	61,7
8	800	25	16	2	150	20	33,4
9	200	25	10	2	150	20	44,3
10	200	25	10	8	150	70	62,8
11	200	400	16	2	150	20	29,2
12	800	25	10	2	730	20	47,6
13	200	25	10	8	730	20	69,7
14	800	400	16	2	150	70	37,1
15	200	400	16	8	730	20	41,8
16	800	400	10	2	150	20	40,2
17	200	25	16	2	730	20	31,9
18	200	400	10	8	150	20	65,0
19	200	25	10	2	730	70	48,6
20	200	25	16	8	150	20	66,8
21	800	25	10	2	150	70	60,9
22	800	400	10	8	730	20	61,8
23	800	25	10	8	730	70	71,3
24	200	400	10	8	730	70	64,3
25	200	400	10	2	730	20	28,6
26	800	25	16	8	150	70	65,0
27	800	400	16	2	730	20	25,1
28	800	400	10	2	730	70	48,0
29	200	25	16	2	150	70	34,5
30	800	400	10	8	150	70	62,9
31	200	400	16	2	730	70	28,5
32	800	400	16	8	730	70	67,0
33	200	25	10	2	150	20	46,4
34	800	25	10	2	150	70	60,1
35	200	400	10	2	150	70	50,2
36	800	400	10	2	150	20	37,3
37	200	25	16	2	150	70	34,2
38	800	25	16	2	150	20	33,1
39	200	400	16	2	150	20	27,8
40	800	400	16	2	150	70	35,2
41	200	25	10	8	150	70	62,4
42	800	25	10	8	150	20	76,6
43	200	400	10	8	150	20	66,5
44	800	400	10	8	150	70	60,2
45	200	25	16	8	150	20	67,4
46	800	25	16	8	150	70	69,8
47	200	400	16	8	150	70	67,2
48	800	400	16	8	150	20	64,8
49	200	25	10	2	730	70	48,7
50	800	25	10	2	730	20	48,4
51	200	400	10	2	730	20	24,1
52	800	400	10	2	730	70	41,2
53	200	25	16	2	730	20	32,2
54	800	25	16	2	730	70	39,8
55	200	400	16	2	730	70	26,4
56	800	400	16	2	730	20	22,1
57	200	25	10	8	730	20	71,3
58	800	25	10	8	730	70	71,1
59	200	400	10	8	730	70	66,2
60	800	400	10	8	730	20	58,5
61	200	25	16	8	730	70	71,2
62	800	25	16	8	730	20	62,3
63	200	400	16	8	730	20	41,8
64	800	400	16	8	730	70	68,5

Run [-]	Load [N]	Velocity [mm/s]	Diameter [mm]	Lead [mm]	Viscosity [mm ² /s]	Temperature [°C]	Efficiency [%]
65	200	25	10	2	150	20	47,6
66	800	25	10	2	150	70	60,7
67	200	400	10	2	150	70	44,5
68	800	400	10	2	150	20	40,7
69	200	25	16	2	150	70	33,6
70	800	25	16	2	150	20	32,7
71	200	400	16	2	150	20	27,7
72	800	400	16	2	150	70	36,4
73	200	25	10	8	150	70	63,4
74	800	25	10	8	150	20	74,3
75	200	400	10	8	150	20	67,8
76	800	400	10	8	150	70	62,0
77	200	25	16	8	150	20	67,1
78	800	25	16	8	150	70	67,6
79	200	400	16	8	150	70	68,6
80	800	400	16	8	150	20	60,2
81	200	25	10	2	730	70	48,8
82	800	25	10	2	730	20	51,3
83	200	400	10	2	730	20	26,4
84	800	400	10	2	730	70	43,1
85	200	25	16	2	730	20	31,0
86	800	25	16	2	730	70	39,9
87	200	400	16	2	730	70	28,0
88	800	400	16	2	730	20	22,2
89	200	25	10	8	730	20	69,0
90	800	25	10	8	730	70	71,6
91	200	400	10	8	730	70	63,4
92	800	400	10	8	730	20	60,2
93	200	25	16	8	730	70	70,7
94	800	25	16	8	730	20	61,7
95	200	400	16	8	730	20	39,5
96	800	400	16	8	730	70	68,4
97	200	25	10	2	150	20	51,3
98	800	25	10	2	150	70	60,9
99	200	400	10	2	150	70	52,2
100	800	400	10	2	150	20	43,0
101	200	25	16	2	150	70	33,6
102	800	25	16	2	150	20	35,8
103	200	400	16	2	150	20	28,9
104	800	400	16	2	150	70	34,5
105	200	25	10	8	150	70	61,7
106	800	25	10	8	150	20	73,1
107	200	400	10	8	150	20	63,6
108	800	400	10	8	150	70	61,5
109	200	25	16	8	150	20	68,0
110	800	25	16	8	150	70	66,6
111	200	400	16	8	150	70	66,5
112	800	400	16	8	150	20	60,8
113	200	25	10	2	730	70	48,3
114	800	25	10	2	730	20	51,0
115	200	400	10	2	730	20	26,4
116	800	400	10	2	730	70	43,8
117	200	25	16	2	730	20	33,3
118	800	25	16	2	730	70	40,4
119	200	400	16	2	730	70	31,6
120	800	400	16	2	730	20	24,8
121	200	25	10	8	730	20	71,8
122	800	25	10	8	730	70	70,6
123	200	400	10	8	730	70	64,5
124	800	400	10	8	730	20	60,6
125	200	25	16	8	730	70	73,5
126	800	25	16	8	730	20	63,8
127	200	400	16	8	730	20	41,9
128	800	400	16	8	730	70	64,2

Anhang 6: D-Optimaler Versuchsplan

Run [-]	Load [N]	Velocity [mm/s]	Diameter [mm]	Lead [mm]	Viscosity [mm ² /s]	Temperature [°C]	Efficiency [%]
1	800	25	10	8	730	20	72,9
2	800	400	10	8	730	45	69,7
3	200	25	16	8	150	20	67,4
4	500	400	16	2	730	70	33,1
5	800	25	10	8	150	70	60,6
6	200	25	16	2	150	20	31,3
7	500	25	10	2	730	70	44,1
8	200	400	10	2	150	20	36,5
9	200	25	10	2	150	20	46,4
10	200	25	16	8	730	20	59,4
11	800	400	16	2	730	70	29,6
12	800	400	10	2	150	45	38,2
13	200	400	16	8	150	70	67,2
14	800	25	10	2	730	70	54,0
15	200	212	16	2	730	20	24,6
16	200	25	16	2	730	70	37,0
17	800	400	10	2	730	20	33,3
18	200	25	10	8	150	70	62,8
19	200	400	10	2	730	70	38,7
20	200	25	16	2	730	70	37,0
21	800	400	10	8	150	70	62,0
22	800	400	16	2	150	70	35,2
23	200	400	16	8	500	20	52,0
24	200	212	16	8	730	20	44,4
25	200	400	10	2	150	70	48,1
26	200	25	10	8	150	70	62,4
27	200	400	16	8	150	20	59,7
28	200	212	16	2	150	70	29,6
29	500	25	10	2	500	20	45,6
30	200	25	16	8	730	45	66,8
31	500	25	10	8	730	20	74,0
32	200	400	10	8	730	20	54,7
33	200	400	10	8	730	20	54,5
34	800	400	16	8	150	20	61,1
35	200	25	16	8	500	20	58,3
36	200	25	10	2	730	70	48,6
37	200	400	16	2	730	20	19,8
38	800	25	10	2	730	20	49,6
39	500	212	16	2	150	45	32,5
40	800	400	16	2	150	20	26,6
41	500	212	16	2	500	70	32,5
42	500	25	16	8	150	70	76,1
43	200	400	16	8	730	70	61,1
44	500	400	16	8	730	45	58,7
45	200	25	16	8	150	70	65,4
46	800	25	10	2	150	70	60,1
47	800	25	16	8	730	70	78,0
48	200	400	16	2	500	70	23,1
49	800	212	10	8	150	20	64,8
50	800	25	16	8	730	20	61,7

Run [-]	Load [N]	Velocity [mm/s]	Diameter [mm]	Lead [mm]	Viscosity [mm ² /s]	Temperature [°C]	Efficiency [%]
51	800	25	10	2	730	70	49,4
52	800	400	10	2	730	20	34,6
53	800	25	10	2	150	20	55,1
54	200	25	10	8	500	45	74,4
55	800	25	10	2	730	45	48,8
56	800	400	16	8	730	20	48,7
57	200	25	10	8	150	20	73,8
58	200	400	16	2	150	70	33,4
59	800	400	16	8	150	45	74,0
60	500	400	10	8	500	70	72,2
61	800	25	10	8	500	70	78,0
62	500	25	16	2	500	20	27,1
63	200	25	10	2	150	70	51,0
64	800	400	10	8	730	20	60,3
65	200	400	10	2	730	45	33,6
66	800	25	16	8	150	45	77,2
67	200	25	10	8	730	20	70,4
68	800	25	16	8	730	70	78,7
69	800	25	10	8	730	70	71,1
70	800	400	10	8	730	70	63,6
71	200	25	10	8	150	45	60,6
72	500	212	10	8	150	70	61,8
73	200	400	10	2	730	20	26,4
74	800	400	16	2	730	20	23,5
75	800	25	16	8	730	20	63,8
76	200	400	10	2	150	20	36,5
77	800	400	16	8	150	20	61,1
78	800	400	10	2	150	70	55,3
79	800	400	16	2	150	70	36,4
80	800	25	16	8	500	70	74,8
81	500	25	10	2	150	70	43,2
82	200	212	10	2	730	20	31,3
83	800	25	16	2	730	45	39,0
84	200	400	16	2	150	20	28,4
85	500	25	16	8	150	70	70,7
86	500	25	10	8	730	20	70,9
87	200	25	16	8	730	70	71,7
88	800	400	10	8	730	45	70,8
89	200	25	10	8	730	70	71,0
90	200	400	10	2	730	70	38,6
91	800	25	10	8	150	20	74,3
92	800	400	16	8	730	70	67,0
93	200	400	16	8	500	45	60,2
94	500	400	10	8	150	70	64,0
95	200	25	16	2	730	20	32,1
96	200	400	16	8	150	70	66,5
97	800	400	10	2	730	70	44,0
98	800	400	16	2	730	70	32,3
99	800	25	16	2	730	20	34,1
100	800	25	16	2	150	70	34,2

Run [-]	Load [N]	Velocity [mm/s]	Diameter [mm]	Lead [mm]	Viscosity [mm ² /s]	Temperature [°C]	Efficiency [%]
101	800	25	16	2	150	20	33,8
102	800	212	16	2	500	70	32,9
103	200	400	10	8	150	20	65,0
104	200	25	16	2	150	20	31,3
105	200	212	10	2	500	70	40,2
106	200	25	10	2	150	20	47,6
107	500	212	16	8	730	70	71,0
108	800	212	10	2	500	20	39,1
109	200	212	10	8	150	45	60,8
110	800	25	10	2	150	70	60,7
111	200	212	10	8	730	70	66,0
112	200	400	10	8	150	70	63,5
113	800	212	10	2	730	70	46,4
114	500	25	16	2	500	45	31,8
115	200	25	10	2	730	20	44,5
116	200	25	10	8	730	70	71,2
117	800	25	16	2	730	20	32,7
118	500	400	10	2	500	70	40,6
119	500	212	16	8	150	20	62,2
120	200	400	16	8	730	70	60,4
121	800	400	16	8	730	20	49,5
122	800	400	10	8	500	20	63,5
123	500	400	16	2	730	20	25,0
124	200	400	10	8	730	70	64,6
125	200	25	16	2	730	70	37,7
126	200	25	16	2	150	70	34,0
127	800	25	16	2	150	70	36,4
128	800	400	16	2	730	70	30,5
129	500	400	16	2	150	20	26,2
130	800	25	10	8	150	45	66,1
131	800	400	10	2	150	20	40,2
132	800	400	10	2	150	20	40,7
133	800	212	16	2	500	20	25,6
134	200	400	16	8	730	70	56,6
135	200	25	16	8	150	20	67,1
136	800	25	16	2	150	20	33,8
137	200	400	16	2	730	20	19,8
138	800	212	10	8	730	70	73,9
139	800	25	16	8	150	20	71,8
140	800	400	10	8	150	70	61,5
141	200	25	10	2	500	20	40,5
142	500	400	10	8	150	20	65,3
143	200	400	16	2	150	45	28,5
144	800	400	10	8	150	20	66,6
145	800	400	16	8	150	70	68,0
146	200	400	10	8	150	20	66,5
147	200	400	10	2	150	70	50,2
148	200	212	10	2	150	45	36,1
149	800	212	16	8	150	70	76,0
150	800	25	10	8	150	20	73,2