

**Konzept einer
zuverlässigkeits-adaptiven Werkzeugwechselstrategie
zur Erhöhung der Verfügbarkeit von Transferlinien
am Beispiel von Bohrern**

Von der Abteilung Sicherheitstechnik des Fachbereichs D der

Bergischen Universität Wuppertal

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

genehmigte Dissertation

von

Diplomingenieur Clemens Dietl

aus Wuppertal

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e. h. B.-J. Vorath

Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Böhle

D 468

Tag der mündlichen Prüfung

14. November 2008

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20080697

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20080697>]

Dankadresse

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Leiter der Abteilung Total Quality Management bei der Firma *Honsberg Lamb* in Remscheid.

An dieser Stelle möchte ich mich bei der Vorsitzenden der Prüfungskommission Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. *Friederike Deuerler* für die Unterstützung der Arbeit bedanken. Ihre kritischen und motivierenden Anmerkungen haben mich sehr bei der Entwicklung des Ansatzes unterstützt. Den Gutachtern Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e. h. *B.-J. Vorath* und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. *M. Böhle* danke ich für ihre Diskussionsbereitschaft und ihre Kritik.

Dem damaligen Geschäftsführer der Firma *Honsberg Lamb* Herrn Dipl.-Ing. *Andreas Quak* danke ich dafür, dass ich alle vorhandenen Mittel und Arbeitsmöglichkeiten für die Durchführung dieser Arbeit nutzen konnte. Den Mitarbeitern Herrn Dipl.-Ing. *Rolf Lindemann*, Herrn *Winfried Seidich*, danke ich ganz besonders für ihre Diskussionsbereitschaft und Unterstützung bei der Durchführung der Versuche, die ich ohne sie nicht hätte durchführen können.

Ein herzlicher Dank geht an meine Eltern, an meinen Vater, der mich in vielen Nachschichten bei den Versuchen begleitet hat und an meine Mutter, die Unterstützung in vielen Bereichen geleistet hat, so dass ich diese Arbeit erstellen konnte.

Für seine Anregungen, sein ständiges Nachfragen und seine immer konstruktive Kritik bedanke ich mich ganz besonders bei Priv.-Doz. Dr.-Ing. Uwe Kay Rakowsky.

Nicht zuletzt danke ich meinen Töchtern Felicitas und Antonia für die Entbehrungen, die sie in dieser Zeit auf sich genommen haben.

Kurzfassung

Die wirtschaftliche Effizienz und die Verfügbarkeit einer Transferlinie werden direkt über die Anzahl der produzierten Werkstücke je Zeiteinheit bewertet. In diesem Zusammenhang wird die Systemleistung besonders durch den Werkzeugwechsel als Instandhaltungsmaßnahme beeinflusst. Die Qualitätsanforderungen an die Bearbeitung bestimmen den maximal zulässigen Verschleiß eines Bohrers, wobei dieser in direktem Zusammenhang mit der Komponentenzuverlässigkeit steht.

Eine Zuverlässigkeitsabschätzung von Hartmetallbohrern wird auf Grundlage einer statistischen Auswertung empirisch ermittelter Daten vorgestellt, um eine *Werkzeugwechselstrategie* zu entwickeln. Der aktuelle Freiflächenverschleiß kann während des Betriebs über einen Vergleich der aktuellen Schnittkraft mit der Schnittkraft-Regressionsfunktion beobachtet werden. An Hand der experimentell ermittelten Schnittkraft-Zeit-Kennlinie der jeweiligen Kombination von Werkzeug- und Werkstückmaterial wird der Freiflächenverschleiß auf Basis der gemessenen Schnittkraft beurteilt. Eine Matrix mit Zwischenstufen unterschiedlicher Schnittgeschwindigkeiten ermöglicht eine Prognose, wie viele Werkstücke gefertigt werden können, bis ein Werkzeugwechsel erforderlich ist.

Um die Ausbringung einer Transferlinie zu erhöhen, wird die geschätzte *time to failure (TTF)* jedes Werkzeugs in jeder Station so abgestimmt, dass ein Maximum an Werkzeugen in unterschiedlichen Stationen gleichzeitig gewechselt werden.

Die Ausbringung einer Transferlinie ohne *Reliability-Adaptive Control (RAC)* wird mit der Ausbringung einer Transferlinie mit *RAC* unter Berücksichtigung unterschiedlicher Regelbedingungen verglichen. Der Ansatz der *zuverlässigkeits-adaptiven Werkzeugwechselstrategie* zur Erhöhung der Verfügbarkeit von Transferlinien wird durch die Simulation einer vier Stationen Transferlinie, unter Berücksichtigung der empirisch gewonnenen *TTFs* der Hartmetallbohrer, validiert.

Abstract

The economic efficiency and the availability of a transfer line are evaluated directly by the quantity of produced parts per time unit. In this context system performance is especially influenced by tool change as a maintenance issue. The quality requirements to the manufacturing define the maximum allowable wear of a drill whereas it is directly linked to the component *reliability*.

A reliability estimation of carbide drills is discussed based on a statistical evaluation of empirical gained data to develop a *tool change strategy*. The current width of flank wear can be observed during operation by comparison of the current cutting force with the cutting force regression function. With the experimentally determined force-time characteristics of the respective material combination of the tool and the part the wear of the cutting edge can be assessed on the basis of the measured cutting force. A matrix with intermediate levels of different cutting speeds allows a prognosis of the number of parts that can still be produced until a tool change is required.

In order to increase the output of a transfer line, the estimated *time to failure (TTF)* of the tools in each station is adjusted in such a way that a maximum of tools in different stations has to be maintained at the same time.

The output of a transfer line without *Reliability-Adaptive Control (RAC)* is compared with the output of a system with *RAC* under consideration of different control conditions. The approach of the *reliability-adaptive* tool change strategy is validated by a simulation of a four-station transfer line with different tool *TTF* under consideration of the empirically gained *TTFs* of carbide drills.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Vorgehensweise	8
1.2	Stand der Technik	9
2	Grundlagen der Zerspanungstechnik	11
2.1	Begriffe und Bezeichnungen des Bohrens	11
2.2	Geometrie und Kinematik des Zerspanungsvorgangs eines Bohrers	11
2.3	Zerspankräfte und Zerspanmomente beim Bohren	12
3	Mathematische Beschreibung des Standzeitverhaltens	15
3.1	Einflussgrößen auf die Schnittkraft und die Standzeit	15
3.2	Standzeitberechnung nach der Standzeitgleichung von Taylor	17
3.2.1	Erweiterte Standzeitgleichung	22
3.3	Optimierung der Schnittwerte zur Steigerung des Output	23
3.3.1	Bestimmung der zu erwartenden Standzeit und angemessenen Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit zum Erreichen der erforderlichen Standzeit	23
3.4	Auswirkung des Verschleißes	28
3.5	Festlegung der maximalen Verschleißmarkenbreite als Standzeitkriterium	28
4	Verschleißüberwachung und -diagnose von Werkzeugen	30
4.1	Thermische Überwachungsmethode	34
4.2	Schwingungs- oder Schallemissionsanalyse	35
4.3	Wirkleistungsüberwachungsmethode	36
5	Verfügbarkeitsanalyse von Transferlinien	39
5.1	Verwendete Begriffe der Zuverlässigkeitstechnik	39
5.1.1	Statistik in der Zuverlässigkeitstechnik	40
5.1.2	Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik bei der Verschleißanalyse von Werkzeugen	41
5.2	Funktionaler Aufbau von Transferlinien	42
5.2.1	Betriebsdatenerfassung an Transferlinien	43
5.3	Zuverlässigkeitstechnische Betrachtung einer Transferlinie	44
5.3.1	Einfluss des Werkzeugwechsels auf die Verfügbarkeit	45

6	Zuverlässigkeitsabschätzung auf Basis der Korrelation von Schnittkraft und Verschleiß	52
6.1	Planung und Spezifikation der Versuche	54
6.2	Versuchsergebnisse	61
7	Konzeption eines Verschleißregelungssystems für eine Transferlinie	69
7.1	Werkzeugeigenschaften	70
7.2	Optimierung der Zerspanung durch zuverlässigkeits-adaptive Regelung	73
7.2.1	Modul-Prozess-Strategie	74
7.2.2	System-Prozess-Strategie	76
7.2.3	Diskussion verschiedener Kombinationen	78
7.2.4	Erläuterung zur Harmonisierung der Werkzeugwechsel-Strategie	82
8	Validierung des deterministischen Ansatzes durch Simulation des Produktionsprozesses	85
8.1	Experimentplanung	86
8.1.1	Schnittparameter in der Simulation	87
8.1.2	Beschreibung des Simulationsmodells	90
8.2	Regelung des Werkzeugverschleißes zum Erhalt einer voreingestellten Werkzeugwechselstrategie	93
8.2.1	Zustandsregelung	94
8.2.2	Regelalgorithmus in der Simulation	95
8.3	Ergebnisse der Simulation	96
8.3.1	Darstellung und Bewertung	97
9	Zusammenfassung und Ausblick	105
10	Literaturverzeichnis	108
11	Anhang	113

Formelzeichen und Abkürzungen:

A	Spanungsquerschnitt	mm^2
a, b, c	Verschleißkategorie eines Werkzeugs ($a = \text{gut}$; $b = \text{schlecht}$; $c = \text{sehr schlecht}$)	-
A_0	Konstante	-
Al-Si	Aluminium-Silizium Stahl	-
A_m	Stationäre Verfügbarkeit	-
$A_m(\tau_m)$	Verfügbarkeit über den Betrachtungszeitraum von 0 bis τ_m	-
$\underline{a_p}$	Spantiefe	mm
\bar{A}	Asymptotische mittlere Verfügbarkeit für $t \rightarrow \infty$ (siehe IEC60050)	-
α		-
α_t	Steigungswinkel der Taylor-Geraden (T - f_s -Diagramm)	Grad
α_s	Steigungswinkel der Geraden der spezifischen Schnittkraft	Grad
α_v	Steigungswinkel der Taylor-Geraden (T - v_c -Diagramm)	Grad
b_1	Exponent der Schnittzeit t_c	-
b_2	Exponent der Schnittgeschwindigkeit v_c	-
b_3	Exponent des Vorschubs f_s	-
b_p	Spanungsbreite	mm
β		
β_j	letzter Bohrungs-Zyklus oder Gesamtanzahl produzierter Bohrungen mit dem j -ten Werkzeug-Zyklus	Stück
β_{nom}	nominal zu produzierende Bohrungsanzahl im j -ten Werkzeug-Zyklus	Stück
$\beta_{\text{prgn}}(\chi)$	aktuelle prognostizierte Bohrungsanzahl die noch mit dem j -ten Werkzeug produziert werden kann	Stück
C	Standzeitkonstante; T bei $v_c = 1 \text{ m/min}$	-
C_1	Standzeitkonstante der Schnittgeschwindigkeit v_{c1}	-
C_μ	Standzeitkonstante; T_μ bei $v_c = 1 \text{ m/min}$	-
C_T	Standzeitkonstante; v_c bei $T = 1 \text{ min}$	-
C_v	Standzeitkonstante; T bei $v_c = 1 \text{ m/min}$	-
χ	Anzahl bereits produzierter Bohrungen mit dem j -ten Werkzeug-Zyklus	Stück
χ_b	Anzahl bereits produzierter Bohrungen	Stück
D	Bohrerdurchmesser	mm
d	Werkstückdurchmesser	mm
DT	Stillstandszeit (Downtime)	min
DT(t)	System-Stillstandszeit (down time) der TL	min
DT(τ_m)	System-Stillstandszeit (down time) der TL über den Betrachtungszeitraum von 0 bis τ_m	min
δ_{kritisch}	kritischer Wert der Abweichung der stetigen von der empirischen Verteilung	-
δ_h	Abweichung der stetigen zur empirischen Verteilung	-
$E(M_{cv}(\beta))$	Erwartungswert des Schnittmoments bezogen auf die Anzahl produzierter Bohrungen β	Nm
E_{ODF}	Effektivität der Transferlinie	-

$\varepsilon_{j,x}$	Dauer des x -ten Werkstück-Zyklus im j -ten Werkzeug-Zyklus	min
FFS	flexibles Fertigungssystem	-
frac	Fraktile (Bruchteil eines Intervalls)	-
$f(\Delta t)$	Dichte der Werkzeugwechsel	-
$F(t)$	Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems	-
$f(TTF)$	Dichte der Standzeit von Werkzeugen	-
F_A	Axialkraft	N
F_c	Schnittkraft	N
F_{eff}	effektive Schnittkraft	N
F_f	Vorschubkraft	N
f_{Motor}	Frequenz des Antriebmotors	Hz
F_p	Passivkraft	N
F_R	Radialkraft	N
f_s	Vorschub je Umdrehung	mm
f_{si}	Vorschub zum Zeitpunkt i	mm
f_z	Vorschub je Schneide	mm
GG-26	Grauguß	-
γ_a	Spanwinkel	Grad
HB	Brinellhärte	-
HM	Hartmetall	-
HV	Vickershärte	-
h	Spanungsdicke	mm
η	Wirkungsgrad	-
η_j	Effektive Dauer, um ω Werkstücke zu produzieren	min
η_{KGWT}	Wirkungsgrad des Kugelgewindetriebs	-
$\eta_{\text{max}}(j)$	Maximale Dauer eines Werkzeug-Zyklus, um ω Werkstücke zu produzieren	min
$\eta_{\text{min}}(j)$	Minimale Nenndauer eines Werkzeug-Zyklus, um ω_{nom} Werkstücke zu produzieren	min
$\eta_{\text{min},i}(j)$	Minimale Nenndauer eines Werkzeug-Zyklus der i -ten Station, um $\omega_{\text{nom},i}$ Werkstücke zu produzieren	min
int	Intervall	-
i	Exponent des Vorschubs f_s (Steigung)	-
I	Leistung des Antriebmotors	A
j	Werkzeug-Zyklus-Index	-
φ_a	Einstellwinkel	Grad
$\cos \varphi$	Leistungsfaktor des Antriebmotors	-
$t_{j,k}$	Dauer des k -ten Werkstück-Zyklus (Taktzeit) im j -ten Werkzeug-Zyklus	min
KGWT	Kugelgewindetrieb	-
KKS	Kühlschmierstoff	-

k	Anzahl bereits produzierter Werkzeuge mit dem j -ten Werkzeug-Zyklus	Stück
k_c	spezifische Schnittkraft	N
$k_{c,scharf}$	spezifische Schnittkraft einer scharfen Schneide	N
$k_{c,stumpf}$	spezifische Schnittkraft einer stumpfen Schneide	N
$k_{c1,1}$	Hauptwert der spezifischen Schnittkraft bei $A = 1 \text{ mm}^2$	N
k_f	spezifische Vorschubkraft	N
$k_{f1,1}$	Hauptwert der spezifischen Vorschubkraft	N
k_T	Steigung der Taylor-Geraden (T - v_c -Diagramm); Exponent der Schnittgeschwindigkeit v_c (Steigung)	-
L_1	Schnittlänge des Werkzeugs je Werkstück	mm
l_β	Bohrtiefe	mm
L_D	Werkstücklänge	mm
l_f	Vorschubweg	mm
L_T	Schnittlänge des Werkzeugs je Standzeit ($L_T = T_L$)	mm
λ	Koeffizient der Anlauf- und Überlaufzeit des Werkzeugs	-
m	Gradient der Steigung der Regressionsgeraden ($m = k$)	-
M_c	Schnittmoment	Nm
m_c	Steigung der spezifische Schnittkraft	-
$m_{c,60}$	Steigung der spezifischen Schnittkraft bei $v_c = 60 \text{ m/min}$	-
$M_{c,ist}$	Istwert des Schnittmoments	Nm
$M_{c,Lim(\beta)}$	zulässiges oberes Schnittmoment, bezogen auf die Anzahl produzierter Bohrungen β	Nm
$M_{c,max}$	maximales Schnittmoment bei Erreichen von VB_{max}	Nm
$M_{c,Soll}$	Sollwert des Schnittmoments	Nm
$m_{c,v}$	Steigung der spezifischen Schnittkraft bei einer gewählten Schnittgeschwindigkeit v_c	Nm
$M_{c60}(0)$	Schnittmoment zu Beginn eines neuen Werkzeugs bei $v_c = 60 \text{ m/min}$	Nm
$M_{c75}(\beta)$	Schnittmoment bei $v_c = 75 \text{ m/min}$, bezogen auf die Anzahl produzierter Bohrungen β	Nm
$M_{cv}(0)$	Schnittmoment zu Beginn eines neuen Werkzeugs	Nm
$M_{cv}(\beta)$	Schnittmoment bezogen auf die Anzahl produzierter Bohrungen β	Nm
m_f	Steigung der spezifischen Vorschubkraft	Nm
M_f	Vorschubmoment	Nm
MFU	Maschinenfähigkeitsuntersuchung	-
M_{L0}	Leerlaufdrehmoment des Motors	Nm
M_m	Motordrehmoment	Nm
M_{mf}	Drehmoment des Motors des Kugelgewindetriebs (Vorschubdrehmoment)	Nm
$MNTF_{60}$	Mittlere Bohrungsanzahl bis zum Ausfall (mean number to failure) mit $v_c = 60 \text{ m/min}$	Stück
$MNTF_v$	Mittlere Bohrungsanzahl bis zum Ausfall (mean number to failure) bei verschiedenen v_c	Stück
$MTTF$	Mittlere Zeit bis zum Ausfall (mean time to failure)	min
$MTTF_{60}$	Mittlere Zeit bis zum Ausfall (mean time to failure) bei $v_c = 60 \text{ m/min}$	min
$MTTF_v$	Mittlere Zeit bis zum Ausfall (mean time to failure) bei verschiedenen v_c	min

m_w	Anzahl der Werkzeugzyklen	Stück
μ	Mittelwert	-
μ_T	Mittelwert der angepassten stetigen Werkzeugwechseldauern	min
n	Anzahl von Stationen	Stück
$\Delta N_{a,i}$	Anzahl der Werkzeugwechsel in Klassen	Stück
N_0	Gesamtanzahl der Werkzeugwechsel	Stück
N_{nomWZW}	nominale Anzahl erforderlicher Werkzeugwechsel	Stück
Non-RAC	Non-Reliability-Adaptive-Controlled (ohne Zuverlässigkeitsadaptive Regelung)	-
n_{rot}	Bohrerdrehzahl	min ⁻¹
n_T	Werkstückanzahl je Standzeit	Stück
$NTF_{1,2,3}$	Bohrungsanzahl bis zum Ausfall des 1-ten, 2-ten und 3-ten Werkzeugs	Stück
NTF_j	Bohrungsanzahl bis zum Ausfall des j -ten Werkzeugs (number of borings to failure)	Stück
NT_{WZW}	entspricht ω_{nom} , nominale Werkstückanzahl zu produzierender Werkstücke	Stück
N_{WZW}	Anzahl der Werkzeugwechsel	Stück
P	Wirkleistung des Antriebmotors	W
P_0	Motor-Leerlaufleistung	W
P_c	Schnittleistung	W
p_c	Schnittstreckenlast	N/mm
p_{ch}	Schnittstreckenlast (Ende Querschneide)	N/mm
p_{cq}	Schnittstreckenlast (Ende Hauptschneide)	N/mm
P_f	Vorschubleistung	W
p_f	Vorschubstreckenlast	W
p_{th}	Vorschubstreckenlast (Ende Querschneide)	N/mm
p_{q}	Vorschubstreckenlast (Ende Hauptschneide)	N/mm
$p_i(t)$	Überlebenswahrscheinlichkeit des i -ten Moduls (Arbeitsstation)	-
P_M	Antriebsleistung	W
q	Radiusverhältnis	-
Q	Effektivität	-
$q_i(t)$	Ausfallwahrscheinlichkeit des i -ten Moduls (Arbeitsstation)	-
RAC	Reliability-Adaptive-Controlled (Zuverlässigkeitsadaptive Regelung)	-
$R(T)$	Überlebenswahrscheinlichkeit des Systems; in diesem Zusammenhang <i>Standzeitzuverlässigkeit</i>	-
r^2	Korrelationskoeffizient; Gütemaß für die Übereinstimmung der angenommenen Geraden	-
r_a	Bohrerradius	mm
r_c	Kontaktradius	mm
R_m	Festigkeit bzw. Zugfestigkeit	N/mm ²
r_q	Querschneidenradius	mm
ρ^*	natürlicher Logarithmus der Zufallsvariablen	-
ρ	Werkstückanzahl bis zum Erreichen von ω_{nom} Werkstücken ab k produ-	Stück

	zierter Werkstücken	
SK	Schneidkeramik	-
SS	Schnellarbeitsstahl	-
S	Schallemissionssignal	mV
s	Standardabweichung der empirisch ermittelten Werkzeugwechselfauern	-
$s_{75}(\beta)$	Standardabweichung der empirisch ermittelten Schnittmomente bei $v_c = 75$ m/min	-
s_c	Lastverhältnis	-
S_i	Arbeitsstation	-
s_i	Ausfallhäufigkeit der i -ten Arbeitsstation	-
$s_{T,v}$	Standardschätzfehler	min
σ	Standardabweichung	-
σ_b	Festigkeit	N/mm ²
$\overline{\sigma}_{75}$	Mittlere Standardabweichung bei $v_c = 75$ m/min	-
σ_T	Streuung der mittleren Standzeit $T_{c\mu}$	min
σ_{Tw}	Standardabweichung der angepassten stetigen Werkzeugwechselfauern	min
σ_w	Spitzenwinkel	Grad
TL	Transferlinie	-
T	Standzeitende bzw. Ausfall	min
t	Zeit	min; s; ms
Δt	Klassenbreite	min
T_0	Standzeit (gefordert)	min
T_{02}	theoretische Standzeit	min
T_2	Standzeit (erwartete)	min
T_{21}	theoretische Standzeit	min
$t_a \dots t_e$	Zeitpunkte im Zeitintervall während einer Bohrung	
t_c	Schnittzeit	min
t_{ci}	Schnittzeit zum Zeitpunkt i	min
t_{cij}	Schnittzeit zum Zeitpunkt i nach der j -ten Schnittgeschwindigkeitsänderung von v_c	min
t_e	Fertigungszeit je Werkstück	min; s
T_{Eff}	Standzeit mit maximaler Effektivität	min; s
t_h	Hauptzeit	min; s
t_{hp}	Hauptzeit je Werkstück	min; s
t_i	Zeitpunkt	min; s
t_{int}	Zeitintervall	min; s
T_L	Standlänge	mm
T_μ	mittlere Standzeit bei $v_{c\mu}$	min; s
t_m	Werkzeugwechselzeit ($t_m = t_w$)	min; s
t_{mk}	Mess- und Kontrollzeit nach einem Werkzeugwechsel	min; s
t_{mw}	Aus- und Einspannzeit eines abgenutzten Werkzeugs	min; s
T_N	Standmenge	Stück
t_n	Nebenzeit	min; s
T_{nom}	nominale Standzeit	min; s

t_{opp}	Betriebsdauer (operative Zeit) je Werkstück	min; s
t_{opr}	Betriebsdauer (operative Zeit)	min; s
T_{ot}	Standzeit zur zeitgünstigsten Schnittgeschwindigkeit	min; s
t_r	Rüstzeit	min; s
TTF	Zeit bis zum Ausfall (time to failure)	min
TTF_{ij}	Zeit bis zum Ausfall des j -ten Werkzeugs an der i -ten Station	min
TTF_j	Zeit bis zum Ausfall des j -ten Werkzeugs	min
$TTR_{i,j}$	Instandhaltungszeit des j -ten Werkzeugs an der i -ten Station	min
TTR_{sysdel}	Spezifische Wartezeit der Transferlinie (des Systems)	min
t_w	Werkzeugwechselzeit	min
$\tau_{i,j,\omega}$	Zeitpunkt bei der Werkstückanzahl ω ; am Ende des j -ten Werkzeug-Zyklus; an der i -ten Station	min; s
τ_j	Zeitpunkt am Ende des j -ten Werkzeug-Zyklus	min; s
$\tau_{j,0}$	Zeitpunkt zu Beginn des j -ten Werkzeug-Zyklus (neues Werkzeug)	min; s
$\tau_{j,k}$	Zeitpunkt am Ende des k -ten Werkstück-Zyklus mit dem j -ten Werkzeug-Zyklus	min; s
$\tau_{j,\omega\text{nom}}$	Zeitpunkt bei der nominalen Werkstückanzahl am Ende des j -ten Werkzeug-Zyklus	min; s
τ_m	Betrachtungszeitraum	min; s
τ_w	Zeitanteil Aus- bzw. Einspannzeit je produziertem Werkstück	min; s
U	Spannung des Antriebmotors	V
UT	Betriebszeit (Uptime)	min
VB	Verschleißmarkenbreite	mm
$VB_{0,4}$	Verschleißmarkenbreite von 0,4 mm	mm
VB_1	Verschleißmarkenbreite der Schnittgeschwindigkeit t_{c1}	mm
VB_2	Verschleißmarkenbreite der Schnittgeschwindigkeit t_{c2}	mm
VB_{Ist}	Istwert der Verschleißmarkenbreite	mm
VB_{max}	maximale Verschleißmarkenbreite	mm
VB_{Soll}	Sollwert der Verschleißmarkenbreite	mm
v_c	Schnittgeschwindigkeit	m/min
v_{ci}	Schnittgeschwindigkeit zum Zeitpunkt i	m/min
$v_{c\mu}$	mittlere Schnittgeschwindigkeit	m/min
v_{cot}	Zeitgünstigste Schnittgeschwindigkeit	m/min
v_{cQ}	Schnittgeschwindigkeit zum Erreichen der maximalen Effektivität	m/min
v_{60}	Schnittgeschwindigkeit $v_c = 60$ m/min	m/min
v_f	Vorschubgeschwindigkeit	mm
WZW	Werkzeugwechsel	Stück
ω	letzter Werkstück-Zyklus bzw. Gesamtzahl produzierter Werkstücke im j -ten Werkzeug-Zyklus	Stück
$\omega_2(k)$	Zu erwartende Werkstückzahl unterhalb von ω_{hom} ; $\omega_2(k) = \omega_{\text{hom}} > k + \omega_{\text{prgn}}(k)$	Stück
$\omega_{\text{aux}}(k)$	Hilfsgröße zur Berechnung der reduzierten Schnittgeschwindigkeit von v_{c1} auf v_{c3}	Stück
$\omega_{b,1}$	Produzierbare Werkstückzahl eines Werkzeugs der Verschleißkategorie	Stück

	b der 1-ten Station	
$a_{b,i}$	Produzierbare Werkstückzahl eines Werkzeugs der Verschleißkategorie b der i -ten Station	Stück
$a_{c,4}$	Produzierbare Werkstückzahl eines Werkzeugs der Verschleißkategorie c der 4-ten Station	Stück
a_{cal}	kalkulierte zu produzierenden Werkstückanzahl	Stück
a_{nom}	nominale Werkstückanzahl der im j -ten Werkzeug-Zyklus zu produzierenden Werkstücke	Stück
$a_{nom,i}$	nominale Werkstückanzahl zu produzierenden Werkstücke an der i -ten Station	Stück
$a_{prgn}(k)$	aktuelle prognostizierte Werkstückanzahl, die noch mit dem j -ten Werkzeug produziert werden kann	Stück
X	Zufallsvariable	-
y	Kehrwert der Steigung der Taylor-Geraden	-
z	Wert auf der Abszissenachse der standardisierten Normalverteilung	-
z_w	Schneidenzahl	Stück

1 Einleitung

Eine *Transferlinie* (TL) ist ein Massenproduktionssystem, das hauptsächlich aus einer begrenzten Anzahl an Stationen besteht, von denen jede ein Werkstück bearbeitet. In einer TL werden bestimmte spezifische Bearbeitungen simultan in den verschiedenen Stationen durchgeführt. Wenn alle fertigungstechnischen Arbeitsvorgänge abgeschlossen sind, werden alle Werkstücke gleichzeitig mit Hilfe einer Transferstange zur jeweils nächsten Station befördert. Transferlinien werden in der Massenfertigung insbesondere in der Automobil- und deren Zulieferindustrie eingesetzt, um Werkstücke unterschiedlichster Art wie zum Beispiel Zylinderblöcke, Getriebegehäuse und Achsschenkel in großen Mengen und in kurzer Zeit herzustellen. Der funktionale Aufbau von Transferlinien ist in Abschnitt 5.2 dargestellt.

Die Station mit der langsamsten Bearbeitung bestimmt die Dauer eines Werkstück-Zyklus. Die analysierte Transferlinie besitzt keine Werkstück-Puffer, die einen signifikanten Einfluss auf die System-Verfügbarkeit haben. Die Effizienzbewertung einer TL wird direkt über die Anzahl produzierter Werkstücke vorgenommen. Der Output, die Verfügbarkeit und die Kosteneffektivität sind Schlüsselthemen in Produktionseinrichtungen, wobei der Instandhaltung eine wichtige Rolle bei der Beurteilung der Unternehmensleistung zukommt. Verfügbarkeitsanalysen an Transferlinien sind aus folgenden Gründen relevant:

1. Transferlinien haben eine besondere wirtschaftliche Bedeutung und der Betreiber strebt auf Grund des erheblichen Kapitaleinsatzes eine hohe zeitliche Nutzung an.
2. Transferlinien stellen die einfachste und direkteste Art des Übergangs zwischen verschiedenen Bearbeitungsstufen dar. Wenn keine Puffer vorgesehen sind, bewirkt ein Stillstand eine Unterbrechung der gesamten Produktion. Dabei sind die Stillstände durch technische Ausfälle oder organisatorische Ursachen bedingt.

Die charakteristische Eigenschaft von Transferlinien ist ihre hohe Leistungsdichte, das heißt die Fertigung einer großen Stückzahl in einem geringen Zeitraum. In Bild 1.1 ist das Fertigungskonzept Transferlinie in Bezug auf Flexibilität und Fertigung der maximalen Stückzahl pro Zeiteinheit anderen Fertigungskonzepten gegenübergestellt.

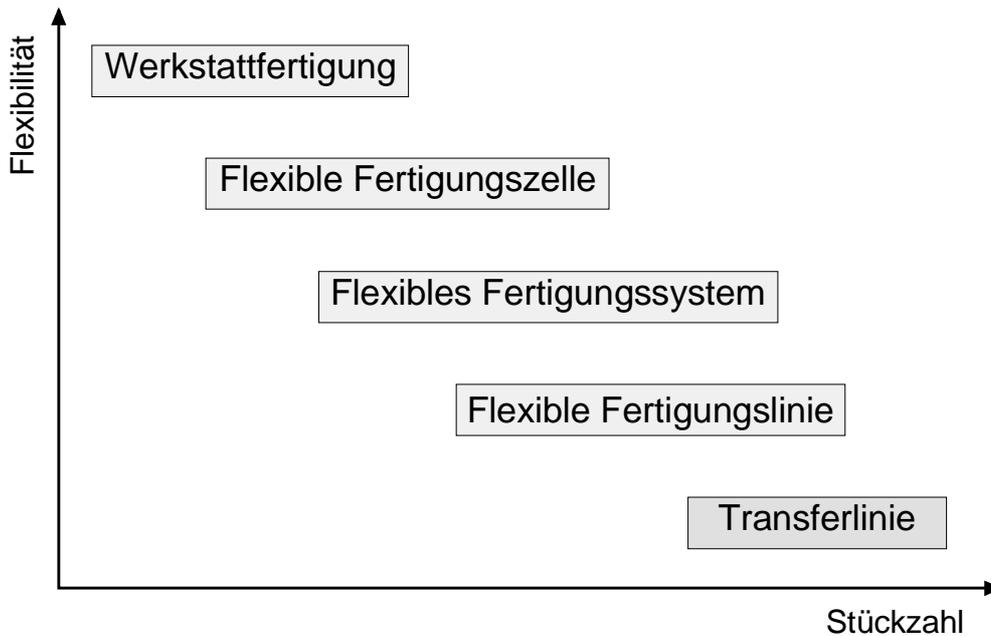


Bild 1.1 Transferlinie im Vergleich mit anderen Fertigungskonzepten in Anlehnung an /Wec98/

Eine Transferlinie besitzt im Vergleich zu flexiblen Fertigungssystemen (FFS) zwei Vorteile: Zum einen kann auf einer kleinen Fläche in kurzer Zeit eine große Werkstückzahl bearbeitet werden und zum anderen ist der erforderliche Personalbedarf vergleichsweise gering.

Demgegenüber steht die hohe Komplexität einer Transferlinie, die im Prinzip aus mehreren verketteten Einzelmaschinen, den so genannten *Arbeitsstationen*, besteht. Diese Arbeitsstationen werden untereinander von der automatisierten Hauptsteuerung der Transferlinie geregelt, wohingegen bei FFS die Abteilung *Fertigungssteuerung* mit zusätzlichem Personal den Materialfluss und alle übrigen Einflüsse zwischen den einzelnen Bearbeitungszentren koordiniert.

Auf Grund der seriellen Verkettung der Arbeitsstationen besteht das größte Problem von Transferlinien darin, dass bei Stillstand einer einzigen Arbeitsstation die Gesamtproduktion unterbrochen wird, soweit keine Puffer zwischen den Stationen existieren. Diese Stillstände können z. B. durch technische Ausfälle, durch erforderliche Wartungen in festgelegten Intervallen oder aber auch durch Stillstände auf Grund organisatorischer Ursachen hervorgerufen werden.

Zur Veranschaulichung der verschiedenen Stillstandsursachen sind in Bild 1.2 verschiedene Faktoren, die den Nutzungsgrad einer Transferlinie einschränken, dargestellt.

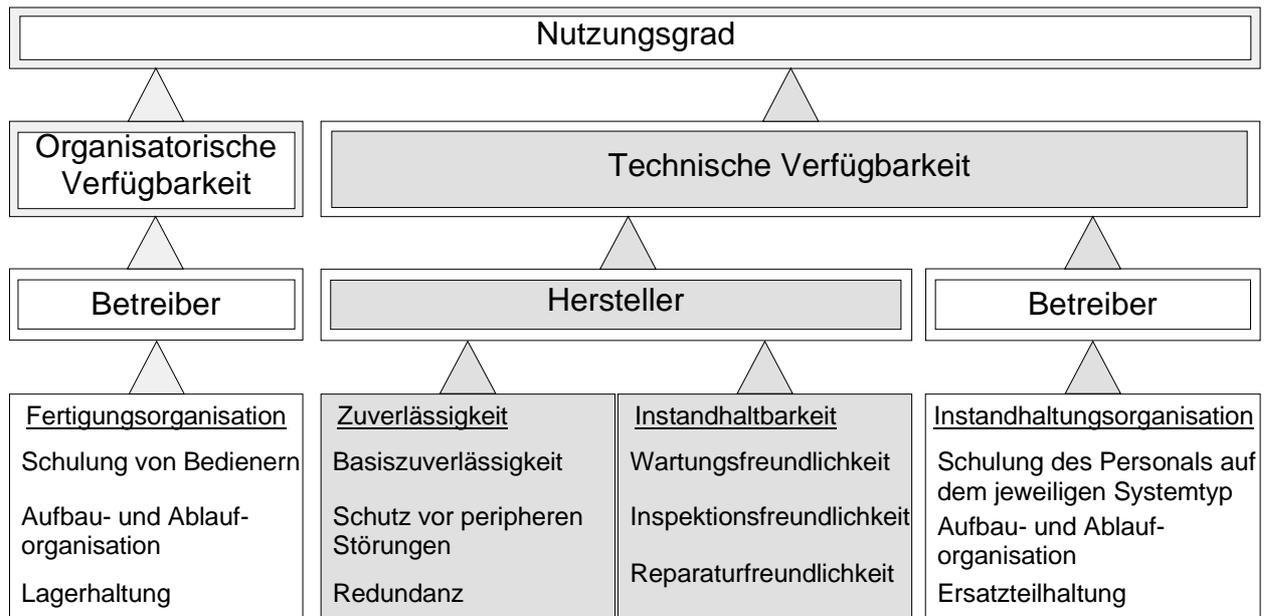


Bild 1.2 Einflussfaktoren auf den Nutzungsgrad in Anlehnung an /Mil92/

Es gibt Einflussfaktoren, für die der Hersteller oder der Betreiber verantwortlich ist, im Folgenden wird jedoch nur auf die technischen Stillstandsursachen und -zeiten eingegangen, die Grundlage für Vereinbarungen zwischen Betreiber und Hersteller bezüglich der technischen Verfügbarkeit einer Transferlinie sind. Dazu werden ausschließlich Stillstandszeiten berücksichtigt, deren Ursachen der Hersteller beeinflussen kann.

Die Auslastung einer Transferlinie wird während einer Maschinenfähigkeitsuntersuchung (MFU) ermittelt, wobei in einem von Betreiber und Hersteller vorher vereinbarten Zeitraum alle Stillstände dokumentiert und den verschiedenen Stillstandsursachen zugeordnet werden. Falls die geforderte technische Verfügbarkeit während des festgelegten Zeitraums nicht erreicht wird, werden Maßnahmen vom Hersteller entwickelt, um diese zu erreichen.

In einer Voranalyse wurde entsprechend /VDI 3423/ und der amerikanischen Richtlinie /PEA/ die Auslastung einer Transferlinie im Hinblick auf ihre Betriebs- und Stillstandszeiten ermittelt. Die Ergebnisse sind in folgendem Bild 1.3 dargestellt.

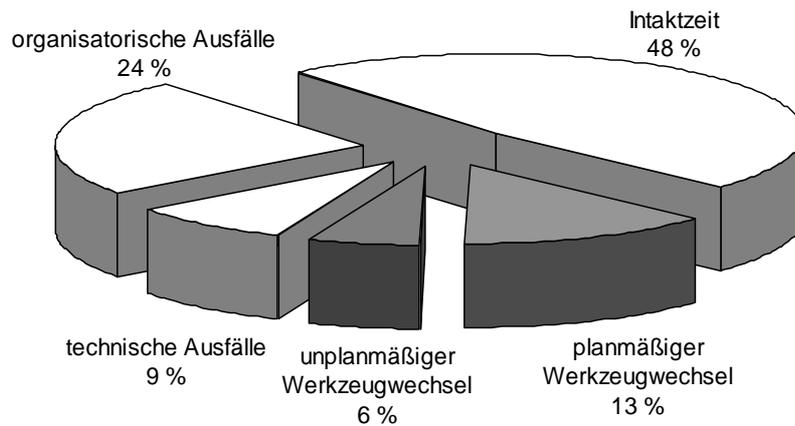


Bild 1.3 Prozentuale Betriebs- und Stillstandszeiten einer Transferstraße

Diese Voranalyse erstreckte sich über einen Zeitraum von 17 Schichten, was einer Produktionszeit von 8.160 Minuten abzüglich 600 Minuten Pause entspricht. Dadurch wurde ein erster Eindruck über häufige Stillstandsursachen gewonnen. Allerdings ist der Zeitraum nicht ausreichend, um eine repräsentative Aussage über die stationäre Verfügbarkeit der analysierten Transferlinie zu treffen.

Die relativ geringe *Intaktzeit* von 48 % ist zum großen Teil auf die vom Betreiber zu verantwortenden Stillstandszeiten auf Grund *organisatorischer Ausfälle* mit 24 % zurückzuführen. Ursachen für diese Stillstände können z. B. Schichtwechselübergabe, Werkstückmessungen außerhalb der Maschine, Versorgung des Maschinenpersonals mit neuen Rohlingen, Ersatzteilbeschaffung oder verlängerte Pausen des Personals sein. Hierauf hat der Hersteller keinen Einfluss.

Die Stillstandszeiten durch *technische Ausfälle* von 9 % sind nach Arbeitsstationen und Stillstandsursachen gegliedert und auf Systemfehler analysiert worden.

Bedeutend sind neben diesen Systemfehlern auch die Stillstandszeiten auf Grund von planmäßiger und unplanmäßiger Werkzeugwechsel von insgesamt 19 %. Hiervon sind 13 % *planmäßige* und 6 % *unplanmäßige* Werkzeugwechsel.

Grundsätzlich sind Werkzeugwechsel während des Produktionsablaufs erforderlich, weshalb das Ziel nur eine Optimierung und Reduzierung eben dieser Werkzeugwechsel auf das absolut Notwendige sein kann.

Die Werkzeugstandzeiten werden kontinuierlich von den Werkzeugherstellern und die Handhabung der Werkzeugwechsel konstruktiv vom Transferlinienhersteller verbessert.

Die o. g. Ergebnisse haben sich in einer zuverlässigkeitstechnischen Analyse und durch die Berechnung der Verfügbarkeit zweier verketteter Transferlinien anhand von Betriebs- und Stillstandszeiten bestätigt /LAE97/. Die dazu benötigten Daten wurden in einem Zeitraum von sieben Wochen im Dreischichtbetrieb, d. h. über einen Zeitraum von 57.120 Minuten, *manuell* erfasst, um eine exakte Zuordnung der Stillstandsursachen zu den Stillständen zu erhalten.

In Bild 1.4 bis Bild 1.7 sind die Stillstandshäufigkeiten und -zeiten der Transferlinien 1 und 2 nach Stillstandsursachen dargestellt.

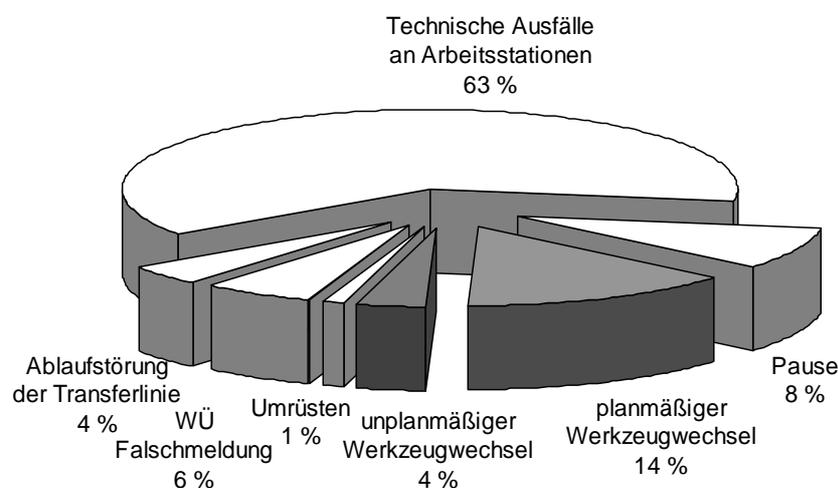


Bild 1.4 Prozentuale Stillstandshäufigkeiten der Transferlinie 1

Nach der Einteilung sämtlicher erfassten Stillstände in eine überschaubare Anzahl von Gruppen ist in allen vier Diagrammen die Gruppe *Technische Ausfälle an Arbeitsstationen* mit den meisten Stillständen festzustellen. Diese Gruppe beinhaltet alle Stillstandsursachen, die zum einen direkt den Arbeitsstationen zuzuordnen sind oder zum anderen in einer Häufigkeit auftreten, welche weitergehende statistische Analysen ermöglichen.

Der *planmäßige* Werkzeugwechsel ist als zweitgrößte Gruppe anzuführen. Dabei wird die Werkzeugwechselstrategie der Transferlinie 1, die mit einer Stillstandshäufigkeit der planmäßigen Werkzeugwechsel von 14 % gekennzeichnet ist, durch *unplanmäßige* Werkzeugwechsel mit einer Häufigkeit von 4 % gestört. Dieses Verhältnis spiegelt sich auch in Bild 1.5 bei den Stillstandszeiten der *planmäßigen* Werkzeugwechsel mit 11 % und den Stillstandszeiten der *unplanmäßigen* Werkzeugwechsel mit 5 %.

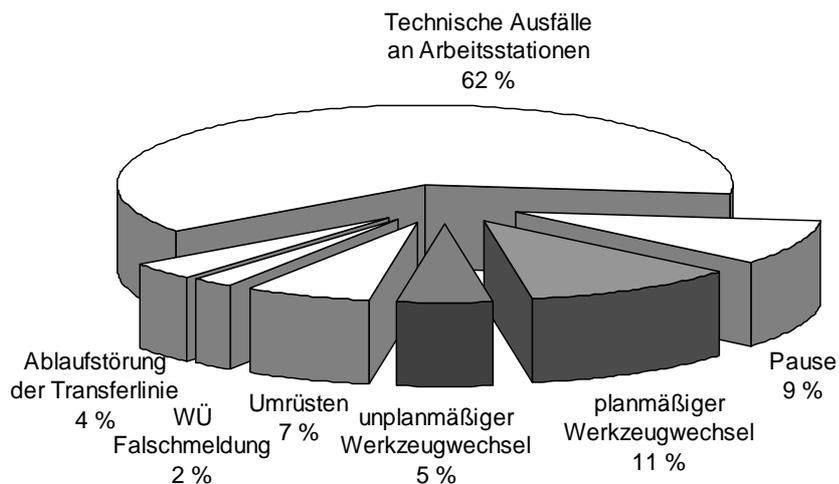


Bild 1.5 Prozentuale Stillstandszeiten der Transferlinie 1

Ein ähnliches Verhältnis der planmäßigen zu den unplanmäßigen Werkzeugwechseln ist sowohl bei den Häufigkeiten als auch bei den Stillstandszeiten der Transferlinie 2 in Bild 1.6 und Bild 1.7 zu erkennen.

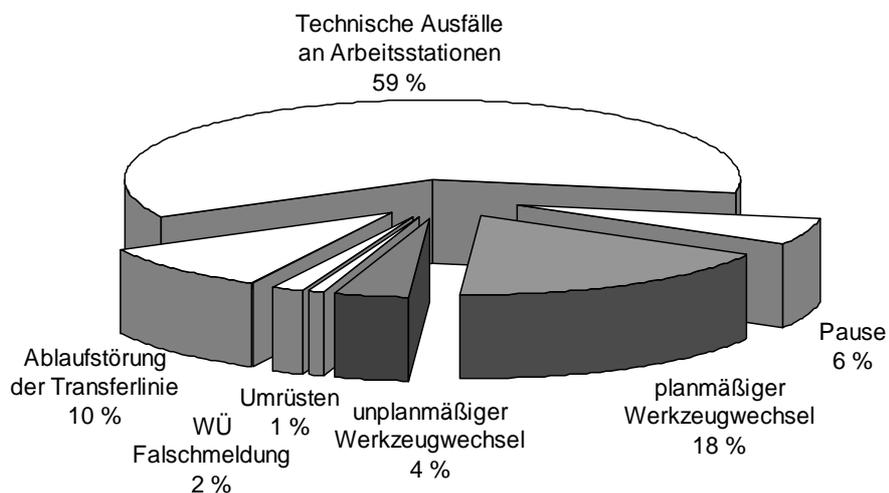


Bild 1.6 Prozentuale Stillstandshäufigkeiten der Transferlinie 2

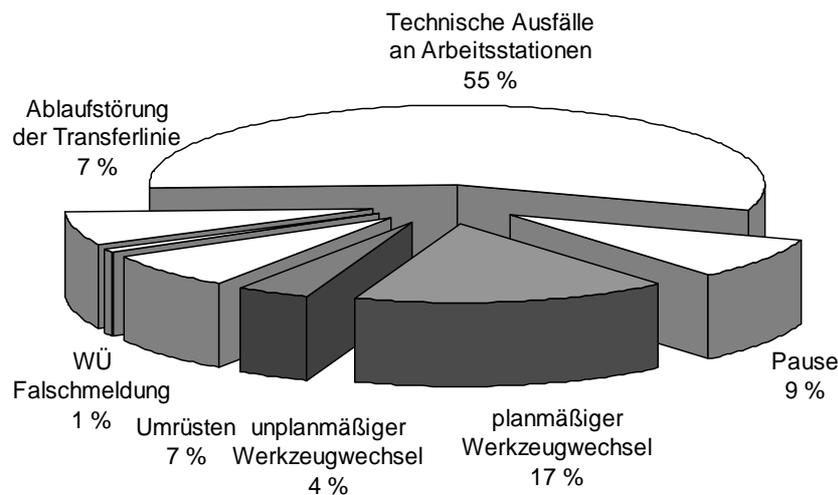


Bild 1.7 Prozentuale Stillstandszeiten der Transferlinie 2

Die empirisch ermittelten Ergebnisse /Lae97/ verdeutlichen, dass neben den verschiedenen Stillstandsursachen an einzelnen Arbeitsstationen ein Systemfehler vorherrscht und somit ein Optimierungsbedarf in der Organisation bzw. im Management der Werkzeugwechsel zu erkennen ist.

Um eine möglichst hohe Ausbringung zu erzielen, besteht die erste Maßnahme in der Verkürzung der Werkzeugwechselzeit und als zweite Maßnahme die Verringerung der Werkzeugwechsel auf eine möglichst kleine Anzahl /Sau73/. Der vorgestellte Ansatz diskutiert eine Werkzeugwechselstrategie, bei der die Standzeiten der Werkzeuge an den einzelnen Arbeitsstationen entsprechend ihres Verschleißzustandes durch Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit geregelt werden.

Ziel des Ansatzes ist es, die Erhöhung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Transferlinien durch Regelung des Werkzeugverschleißes zur Einhaltung einer *vorgegebenen Werkzeugwechselstrategie* darzulegen. Dies wird durch den Vergleich von Simulationen einer Transferlinie mit vier Arbeitsstationen validiert.

Bei der Entwicklung der Werkzeugwechselstrategie einer Transferlinie sind die Grundprinzipien des Werkzeugverschleißes, die zeitabhängige Ausfallwahrscheinlichkeit und der Erwartungswert des Werkzeuges, zu berücksichtigen.

Anforderungen an die durchzuführenden Werkzeugwechsel einer Transferlinie sind:

1. möglichst wenig Werkzeugwechsel durchführen, welches durch die Standzeit der einzelnen Werkzeuge und somit durch die Weiter- und Neuentwicklungen seitens der Werkzeughersteller beeinflusst wird,
2. Werkzeugwechsel an verschiedenen Stationen möglichst gleichzeitig durchführen, was immer ein Kompromiss zwischen absolutem Verschleiß des einzelnen Werkzeuges und optimalem kollektiven Wechsel mehrerer Werkzeuge an unterschiedlichen Stationen mit sich bringt. Hier besteht Potenzial, die Verfügbarkeit von Transferlinien zu erhöhen, indem der Prozess der *Werkzeugwechselstrategie*, der die Organisation der Werkzeugwechsel bedeutet, zeit- und kostenoptimal eingestellt und überwacht wird.

1.1 Vorgehensweise

Der vorgestellte Ansatz soll durch dazu beitragen die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Transferlinien zu erhöhen. Dieses bedeutet:

- Die Aufdeckung möglicher Schwachstellen und daraus resultierend die Vermeidung von Ausfällen und die Reduzierung von Stillstandszeiten.
- Die Darstellung der Verschleißregelung des Werkzeugs bei der Werkzeugwechselstrategie einer fiktiven Transferlinie und
- die Simulation einer Werkzeugwechselstrategie, mit permanenter Zuverlässigkeits-Datenübertragung zur Prozessregelung.

Im folgenden Kapitel 2 werden erforderliche Grundlagen der Zerspanungstechnik dargestellt. Kapitel 3 beschreibt das Standzeitverhalten von Werkzeugen, anschließend werden in Kapitel 4 verschiedene Methoden der Verschleißüberwachung und -diagnose von spanenden Werkzeugen dargestellt. In Kapitel 5 werden die in diesem Ansatz erforderlichen Grundlagen der Verfügbarkeitsanalyse, insbesondere in Bezug auf den Werkzeugwechsel an Transferlinien vorgestellt. In Kapitel 6 wird ausführlich die Kraftwirkung auf Grund des Verschleißes von empirisch ermittelten Betriebsdauerdaten an Vollhartmetallbohrern analysiert. Darauf basierend wird in Kapitel 7 eine zuverlässigkeits-adaptierte Regelung des Werkzeugverschleißes zur Einhaltung einer vorgegebenen Werkzeugwechselstrategie vorgestellt, um die Verfügbarkeit von Transferlinien zu erhöhen. In Kapitel 8 wird abschließend die Verfügbarkeitssteigerung auf Grund der Verschleißregelung durch Simulation validiert.

1.2 Stand der Technik

Während der Planungsphase einer Transferlinie werden kritische Werkzeugstandzeiten intensiv analysiert und – falls erforderlich – werden Zerspanungsversuche mit standzeitkritischen Werkzeugen und dem zu bearbeitenden Werkstoff durchgeführt, um frühzeitig Zerspan- und Standzeitproblemen durch eine gezielte Auswahl von Schneidmaterialien und der Festlegung von Schnittwertgrenzen entgegenzuwirken.

Grundlegende Probleme werden somit erkannt und der Werkzeughersteller ist in der Lage, mit seinem Know-how über Schneidmaterialien, Hartmetallsorten, Schneidwinkel, Beschichtungen u. ä. frühzeitig Änderungen zur Optimierung der Standzeit vornehmen. Jedoch ist die Anzahl der Standzeitversuche für das ausgewählte Werkzeug nicht groß genug, um statistische Aussagen über die Standzeit der gewählten Werkstückstoff-Schneidstoff-Kombination treffen zu können. Da die Zusammensetzung und Vorbearbeitung (z. B. Schmieden oder Gießen) des im Standzeitversuch verwendeten Werkstückstoffs nicht exakt den Bedingungen des tatsächlichen Werkstücks entspricht und die Versuche zeitlich stark begrenzt sind, können nur bedingt Kenntnisse über Schwankungen der Zusammensetzung oder der Härte sowie der Qualität (Lunker) des Werkstückstoffs gewonnen werden.

Aus diesen Gründen werden erst in der Phase der Inbetriebnahme die Zyklen der Werkzeugwechsel an den einzelnen Arbeitsstationen auf Basis empirisch gewonnener Standzeiten in Form einer starren Werkzeugwechselstrategie in die Hauptsteuerung implementiert. Da in den Arbeitsstationen unterschiedliche Bearbeitungen wie Fräsen, Bohren oder Gewinden durchgeführt werden, sind die wirkenden Werkzeugbelastungen und somit auch die Standzeiten der Werkzeuge unterschiedlich.

Im Folgenden wird dargestellt, welche technischen Überwachungsmittel entwickelt und eingesetzt werden, um insbesondere einen zufälligen Werkzeugbruch, der einen Totalausfall des Werkzeugs und einen ungeplanten längeren Stillstand der Transferlinie bedeutet, zu vermeiden.

Der Entwicklung der *Werkzeugbruchüberwachung* folgte die Entwicklung der *Ver-schleißüberwachung* des Werkzeugs. Beide Entwicklungen zielen darauf ab, Stillstandszeiten einer Transferlinie auf Grund von Zerspanproblemen oder auch nur auf Grund von Werkzeugwechsel zu reduzieren, da wegen des Werkzeugwechsels an einer Arbeitsstation die gesamte Produktion stillsteht.

Es gibt verschiedene technische Möglichkeiten das Werkzeug zu überwachen, so dass kein Werkzeugbruch entsteht oder die Belastung auf das Werkzeug und somit den Ver-

schleißzustand bzw. die restliche Standzeit abzuschätzen. An dieser Stelle sollen nur kurz die in der Praxis vorwiegend eingesetzten Überwachungsmethoden genannt werden.

Ein bewährtes Verfahren ist die *Wirkleistungsmessung* des Antriebmotors, mit Hilfe dessen das Motordrehmoment und die Belastung auf das Werkzeug ermittelt werden können. Der Vorteil dieser Methode ist die technisch einfache Nachrüstung und relative Unempfindlichkeit gegenüber den Umgebungsbedingungen. Der Nachteil ist die verhältnismäßig große Entfernung zum eigentlichen Einwirkungort der Belastung auf das Werkzeug, wobei zwischengeschaltete mechanische Elemente von Getrieben oder Schlitten die Leistungsmessung dämpfen können.

Ein weiteres Verfahren ist die *Körperschallmessung*, wobei der Körperschall an der Maschine gemessen wird und, bei Überschreiten eines festgelegten Grenzwertes, ein Werkzeugbruch vermieden werden kann. Auch können mittels Körperschallmessung zusätzliche Verschleißüberwachungen des Werkzeuges durchgeführt werden. Der Schallsensor sollte an der Spannvorrichtung des Werkstücks oder am Werkzeugadapter montiert werden. Ein Nachteil dieser Methode ist die Empfindlichkeit des Schallsensors bei ungünstigen Umgebungsbedingungen wie z. B. durch Kühlschmierstoffe.

Ein weiteres wichtiges Verfahren ist die *Drehmomentmessung* direkt an der Werkzeughalterung. Dabei werden Dehnungsmessstreifen (DMS) auf den Werkzeughalter appliziert, wobei das bei der Bearbeitung entstehende Drehmoment durch DMS-Signale berührungslos an eine Rotorelektronik weitergeleitet wird.

Im neuen Ansatz der zuverlässigkeits-adaptiven Werkzeugwechselstrategie wird die Überwachung des Werkzeugverschleißes, der als Zufallsereignis zahlreicher unterschiedlicher Einflüsse angesehen werden kann, unter Berücksichtigung abgeleiteter Zuverlässigkeitskenngrößen betrachtet, sodass der unabdingbar erforderliche Werkzeugwechsel zu einem gewünschten und optimalen Zeitpunkt erfolgen kann.

2 Grundlagen der Zerspanungstechnik

Bei der Zerspanung werden von einem Werkstück durch eine oder mehrere Schneiden Werkstoffteile in Form von Spänen mechanisch getrennt. Die Anzahl, die Form und die Lage der Schneiden zum Werkstück sind beim Zerspanen mit geometrisch bestimmten Schneiden beschreibbar.

Im Allgemeinen wird unter Bohren die Lochbearbeitung mit Spiralbohrern verstanden; spezielle Verfahren sind das Senken, Reiben und Bohren mit Bohrstangen.

Im neuen Ansatz der zuverlässigkeits-adaptiven Werkzeugwechselstrategie basieren die empirisch ermittelten Daten auf Versuchen, die mit Spiralbohrern aus Vollhartmetall durchgeführt worden sind. Jedoch sollte es möglich sein, Werkzeuge wie Drehmeißel, Fräser oder Gewindeschneider in eine *dynamische Werkzeugwechselstrategie* zu integrieren, soweit der Verschleiß durch die Krafterhöhung erkennbar ist.

2.1 Begriffe und Bezeichnungen des Bohrens

Das Bohren kann als spanendes Verfahren mit drehender Schnittbewegung, bei dem das Werkzeug eine Vorschubbewegung in Richtung der Drehachse ausführt, bezeichnet werden. Der Spiralbohrer dient dem Bohren ins volle Material zur Erzeugung einer kreiszylindrischen Innenfläche, die koaxial zur Drehachse der Schnittbewegung liegt. Spiralbohrer werden in der Regel für Bohrungen mit einem Durchmesserbereich von 1 mm bis 20 mm und einer Bohrtiefe, die dem fünffachen des Durchmessers entspricht, eingesetzt /Dub90/. Der Spiralbohrer setzt sich aus Schaft und Schneidteil zusammen. Der Schaft wird in die Werkzeugmaschine eingespannt und überträgt das Antriebsmoment auf den Schneidteil.

2.2 Geometrie und Kinematik des Zerspanvorgangs eines Bohrers

Durch Veränderung des Spitzenwinkels σ_w sowie des Anschliffs kann der Bohrer an seine Bearbeitungsaufgaben angepasst werden. Führen diese Änderungen nicht zum gewünschten Erfolg, so muss ein Bohrer mit anderem Profil und anderer Kerndicke oder einer anderen Spannutengeometrie und anderem Drallwinkel ausgewählt werden.

Die Spannuten müssen so profiliert sein, dass dem Spantransport zum einen möglichst viel Raum zur Verfügung steht und zum anderen der Bohrer noch ausreichend torsionssteif ist. Die Querschneide verbindet die beiden Hauptschneiden miteinander und entfernt den Werkstoff vor dem Kern des Bohrers /Tön 95/.

2.3 Zerspankräfte und Zerspanmomente beim Bohren

Die auf einen Spiralbohrer wirkenden Kräfte sind in Bild 2.1 dargestellt. Die Belastung auf den Bohrer setzt sich aus den auf jede Schneide axial wirkenden Vorschubkräften F_{f1} , F_{f2} und den tangential wirkenden Schnittkräften F_{c1} , F_{c2} zusammen. Die Passivkräfte F_{p1} und F_{p2} heben sich beim Bohren auf.

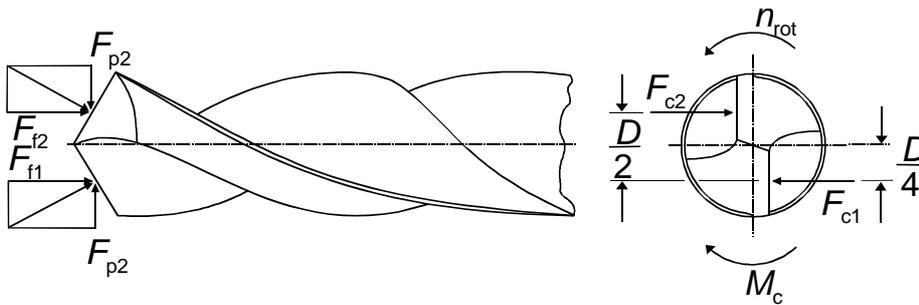


Bild 2.1 Kräfte am Spiralbohrer /Tön95/

Wird für eine Schneidenlänge der halbe Nenndurchmesser $D/2$ angenommen, dann wird der Kraftangriffspunkt in der Mitte der Schneidenlänge am Hebelarm $D/4$ wirksam. Die Schnittkraft F_c der Hauptschneide kann durch

$$F_c = b_p \cdot h \cdot k_c \quad (2.1)$$

ermittelt werden, wobei entsprechend /DIN 6584/ k_c die spezifische Schnittkraft ist.

In Versuchen wurde festgestellt, dass die spezifische Schnittkraft k_c eine Funktion der Spanungsdicke h mit einer Steigung m_c ist. Eine Änderung der Spanungsbreite b_p hat keinen nennenswerten Einfluss auf die spezifische Schnittkraft.

Bild 2.2 zeigt den Verlauf der spezifischen Schnittkraft k_c als Funktion der Spandicke h . Die Darstellung von k_c über h als Kurve im arithmetischen Koordinatensystem lässt sich im doppeltlogarithmischen Koordinatensystem als Gerade annähern, womit sich k_c als

$$k_c = k_{c1.1} \cdot h^{-m_c} \quad \rightarrow \quad m_c = \frac{\ln(k_{c1}/\ln k_{c1.1})}{\ln(h_1/\ln h_{1.1})} \quad (2.2)$$

schreiben lässt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Annäherung der Kurve im k_c - h -Diagramm als Gerade nur abschnittsweise gültig ist. Der Hauptwert der spezifischen Schnittkraft $k_{c1.1}$ wird bei einem Spanungsquerschnitt von $A = b_p \cdot h = 1 \text{ mm}^2$ ermittelt /Mil92/.

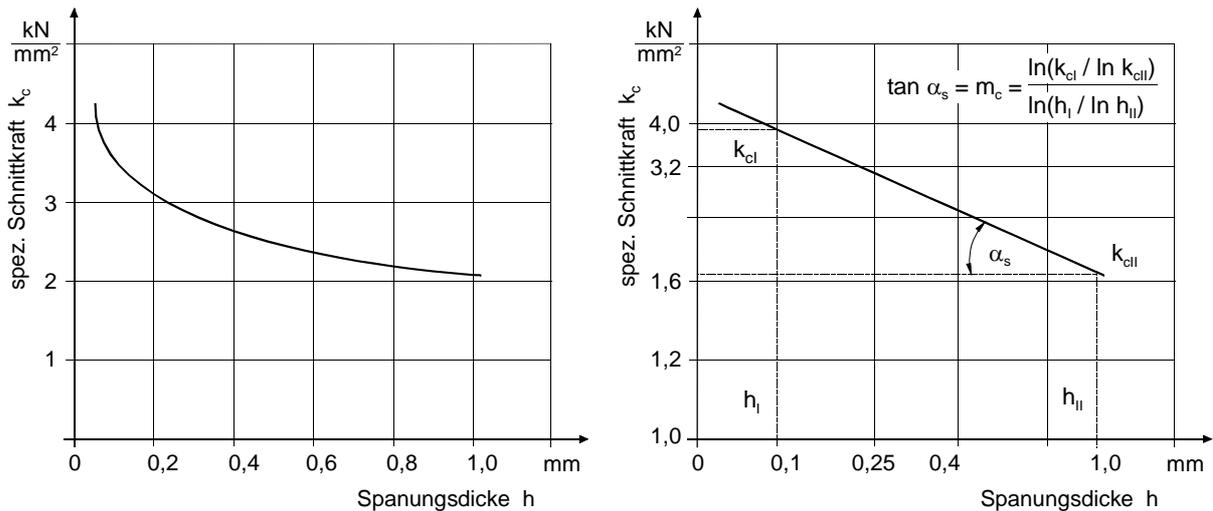


Bild 2.2 Spezifische Schnittkraft in Abhängigkeit von der Spandicke h /Mil92/

Die Schnittkraft F_c kann somit durch

$$F_c = b_p \cdot h^{1-m_c} \cdot k_{c1.1} \quad (2.3)$$

berechnet werden. Hierbei müssen die Kennwerte der Zerspankraft für unterschiedliche Werkstoffe unter Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren für das jeweilige Bearbeitungsverfahren empirisch ermittelt werden /Per90/.

Die Hauptwerte $k_{c1.1}$ und die Steigungsfaktoren $1 - m_c$ der spezifischen Schnittkraft wurden empirisch von Pahlitzsch und Spur ermittelt /Per90/. In den durchgeführten Versuchen wurden Werkstücke aus dem Werkstoff 42CrMo4V eingesetzt. Er hat eine Festigkeit R_m von 1080 N/mm^2 ; für den Steigungsfaktor $1 - m_c$ gilt $0,86$ und für die spezifische Schnittkraft 2720 N/mm^2 . Die Schnittleistung P_c wird aus der Schnittkraft F_c und der Schnittgeschwindigkeit v_c durch

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot 1000} \quad (2.4)$$

bestimmt. Bei der Bestimmung der Antriebsleistung P_M durch

$$P_M = \frac{P_c}{\eta} \quad (2.5)$$

muss der Wirkungsgrad η des Hauptantriebs berücksichtigt werden. Die Vorschubkraft F_f wird durch

$$F_f = D \cdot h^{1-m_f} \cdot k_{f1.1} \quad (2.6)$$

berechnet. Die Hauptwerte $k_{f1.1}$ und die Steigungsfaktoren $1 - m_f$ der spezifischen Vorschubkraft wurden empirisch von König, Depiereux, Essel /KöDeEs72/ ermittelt. Der in den Versuchen eingesetzte Werkstückwerkstoff 42CrMo4V ist für die Festigkeit R_m ein

Wert von 1080 N/mm^2 , für den Steigungsfaktor $1 - m_f$ ein Wert von 0,71 und für die spezifische Schnittkraft ein Wert von 2370 N/mm^2 berücksichtigt worden. Die Vorschubgeschwindigkeit v_f wird nach Gleichung

$$v_f = f_s \cdot n_{rot} \quad (2.7)$$

und die Vorschubleistung P_f aus der Vorschubkraft F_f und der Vorschubgeschwindigkeit v_f durch

$$P_f = \frac{F_f \cdot v_f}{60 \cdot 10^6} \quad (2.8)$$

bestimmt.

3 Mathematische Beschreibung des Standzeitverhaltens

3.1 Einflussgrößen auf die Schnittkraft und die Standzeit

Die von Kienzle 1952 /Kie52/ erstellte Liste der 15 Einflussgrößen, die die Schnittkraft F_c unterschiedlich stark beeinflussen, wurde von Degner, Lutze, Smejkal /DeLuSm93/ auf zehn Größen

- Werkstoff,
- Vorschub bzw. Spanungsdicke,
- Schnitttiefe bzw. Spanungsbreite,
- Spanungsverhältnis,
- Spanwinkel,
- Einstellwinkel,
- Schnittgeschwindigkeit,
- Schneidstoff,
- Kühlung bzw. Schmierung und
- Schneidverschleiß

reduziert. In Bild 3.1 ist links der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit und rechts der Einfluss des Verschleißes auf die Schnittkraft F_c schematisch dargestellt.

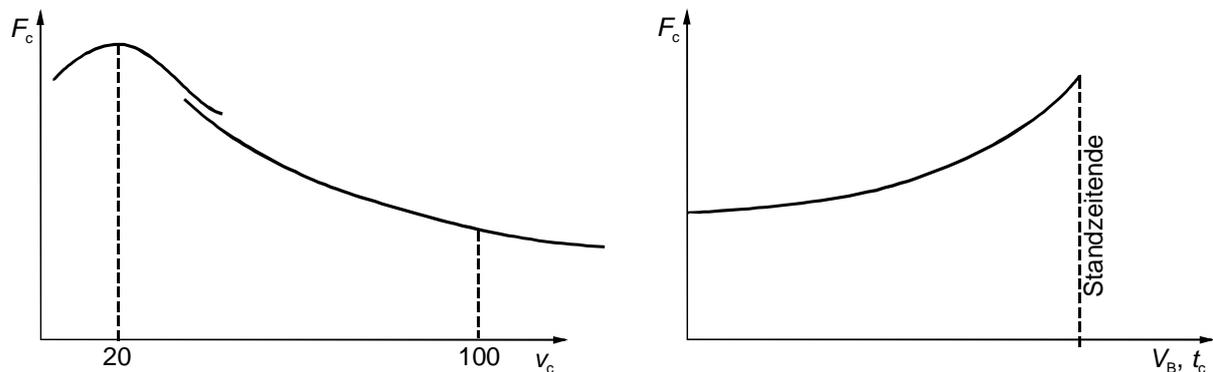


Bild 3.1 Einfluss von Schnittgeschwindigkeit v_c (links) und Verschleiß auf die Schnittkraft F_c /DeLuSm93/

Das zweite Diagramm in Bild 3.1 zeigt den Schnitkraftanstieg bei zunehmender Schnittzeit t_c auf Grund des wachsenden Verschleißes V_B . Die Schnittkraft kann entsprechend des Verschleißkriteriums V_B , welches auf Basis der Qualitätsanforderungen festgelegt wird, um 30 % bis 50 % gegenüber einer arbeitsscharfen Schneide ansteigen.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen (siehe Kapitel 6) sind die Schnittgeschwindigkeit und der Schneidverschleiß als Einflussgrößen auf die Schnittkraft von Bedeutung, da bei den eingesetzten verwendeten Bohrern die Schnitttiefe, das Spanungsverhältnis, der Span- und der Einstellwinkel sowie der eingesetzte Werkstoff

und der Schneidstoff nicht verändert wurden. Der Vorschub wurde während aller Versuche konstant gehalten.

Durch die schnellen und starken NC-Steuerungen ist es möglich, die Schnittgeschwindigkeit auf die eingestellten Werte mit einer Toleranz von einer Umdrehung pro Minute zu halten. Somit ist die Schnittgeschwindigkeit innerhalb des eingestellten Wertes zur Entwicklung einer Standzeitgeraden als konstant anzusehen. Um einen möglichst schnellen Verschleiß und eine Reduzierung der Einflussgrößen zu erhalten, wurde absolut trocken bearbeitet, womit der Einflussfaktor Kühlung auf die ermittelten Standzeiten ausgeschlossen werden kann. Demnach bleibt aus der oben genannten Liste nur der *Schneidenverschleiß* als veränderliche Einflussgröße auf die Schnittkraft, das bedeutet, dass vom Anstieg der Schnittkraft auf den fortschreitenden Verschleiß geschlossen werden kann.

Der Einfluss der Spanungsgrößen Schnittgeschwindigkeit und Vorschub auf die Standzeit ist in /DeLuSm93/ dargestellt. Für die Auswahl des richtigen Werkzeuges in den praktischen Anwendungen sind zu den dargestellten Einflüssen noch der Span-, Frei- und Einstellwinkel zu berücksichtigen. Da für diesen Ansatz zur empirischen Standzeitermittlung die Bohrer und somit auch die Span-, Frei- und Einstellwinkel vorgegeben waren, sind deren Einflüsse auf die Standzeit nicht berücksichtigt.

Das linke Diagramm in Bild 3.2 stellt die gebräuchlichste Darstellung des Standzeitdiagramms, den Einfluss der Schnittgeschwindigkeit v_c auf die Standzeit T , dar. Voraussetzung hierfür ist, dass der Werkstoff, der Schneidstoff, der Vorschub f_s und die Schnitttiefe a_p konstant sind. Mit steigender *Schnittgeschwindigkeit* sinkt unter sonst konstanten Bedingungen die *Standzeit* und umgekehrt.

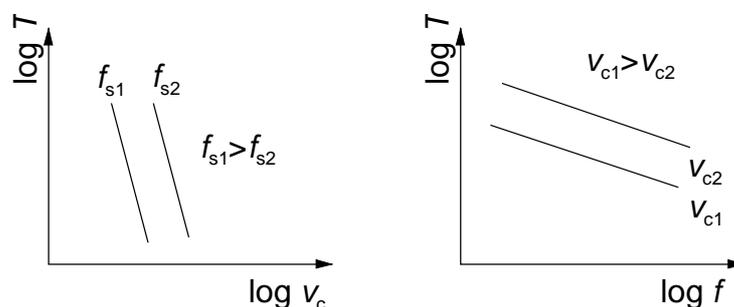


Bild 3.2 Einfluss verschiedener Spanungsparameter auf die Standzeit T /DeLuSm93/

Der Einfluss des Vorschubs f_s auf die Standzeit T – unter der Bedingung, dass der Werkstoff, der Schneidstoff, die *Schnittgeschwindigkeit* v_c und die Schnitttiefe a_p kon-

stant sind – wird im rechten Diagramm in Bild 3.2 gezeigt. Wird der Vorschub erhöht, sinkt unter sonst gleichen Bedingungen die Standzeit.

3.2 Standzeitberechnung nach der Standzeitgleichung von Taylor

Die Betriebsdauer eines Werkzeugs wird nach DIN 6583 im Allgemeinen mit einer der Standgrößen Standzeit T , Standweg T_L oder Standmenge T_N angegeben.

Die Standzeit T ist die tatsächliche Schnittzeit, die ein Werkzeug vom Arbeitsbeginn bis zum Erreichen einer vorher festgelegten Verschleißgrenze unter gegebenen Bedingungen Zerspanarbeit leistet, bis es nachgeschliffen oder seine Schneide gewechselt werden muss. Sie berechnet sich zu

$$T = \sum t_h, \quad (3.1)$$

wobei t_h die Hauptzeit, das heißt die Zeit, die das Werkzeug tatsächlich zerspant, beschreibt. Das Standzeitende ist am Standzeitkriterium, zum Beispiel der Verschleißmarkenbreite VB oder dem Kolkverhältnis KT , das eine festgelegte Größe nicht überschreiten darf, zu erkennen.

Die Standlänge T_L beschreibt den gesamten Vorschubweg l_f , den das Werkzeug während der Standzeit T zurücklegt. T_L wird von der Standzeit T und der Vorschubgeschwindigkeit v_f beeinflusst. Sie wird durch

$$T_L = T \cdot v_f \text{ bzw. } T_L = T \cdot n_{rot} \cdot f_z \cdot z \quad (3.2)$$

berechnet, wobei n_{rot} die Bohrerndrehzahl, f_z den Vorschub je Schneide und z_w die Zahl der Schneiden repräsentieren. Die Standmenge T_N beschreibt die Anzahl der Werkstücke oder die Anzahl der Bearbeitungen (Bohrungen), die während der Standzeit durchgeführt wird. Für sie gilt

$$T_N = \frac{T}{t_h}. \quad (3.3)$$

Bild 3.3 zeigt den typischen Kurvenverlauf der Standzeit T als Funktion der Schnittgeschwindigkeit v_c , der bei einer doppeltlogarithmischen Darstellung näherungsweise als Gerade angeglichen werden kann.

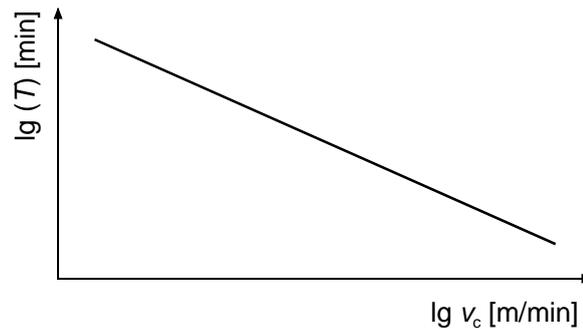


Bild 3.3 Standzeit T als Funktion der Schnittgeschwindigkeit v_c

Taylor formulierte in [Tay07], dass der Einfluss der Parameter Schnittgeschwindigkeit, Vorschub und Spantiefe auf die Standzeit am besten bestimmt werden kann, wenn die Schnittgeschwindigkeit in Meter pro Minute ermittelt wird, bei der das Werkzeug nach einer Standzeit von 20 Minuten vollständig unbrauchbar ist.

Taylor schreibt, dass mit Benutzung dieser 20 Minuten-Periode die Versuche, die einen Zeitraum von 26 Jahren in Anspruch nahmen, in vier bis fünf Jahren hätten durchgeführt werden können, siehe [Tay07], § 24. Diese Methode setzt natürlich voraus, dass die erforderlichen Bedingungen wie ausreichende Maschinensteifigkeit und genügendes Antriebsmoment erfüllt sind. Bedingt durch die stetige Werkzeugentwicklung und die Verwendung von Materialien wie Hartmetall, Legierungen und Beschichtungen, ist eine Bearbeitung mit Schnittwerten möglich, die um ein Vielfaches höher liegt als die von Taylor oder sogar die der 1980er-Jahre.

Während in den 1940ern noch Standzeiten von vier bis acht Stunden angestrebt wurden, galten in den 1960ern auf Grund der wachsenden Maschinenkosten Standzeiten von 60 Minuten als wirtschaftlich [KöKl97]. Infolge der ständig sinkenden Kosten für Werkzeugschneiden und des verbesserten Standzeitverhaltens beziehen sich aktuelle Schnittwertempfehlungen der Werkzeughersteller auf Standzeiten von 15 Minuten [KeHe99].

Hinsichtlich einer Werkzeugwechsel-Strategie ist nicht nur die tatsächliche Standzeit, die wie oben ausgeführt als Summe der Hauptzeiten t_h berechnet wird, sondern es sind auch die so genannten Nebenzeiten t_n , die für die Bearbeitung eines Werkstücks erforderlich sind, zu berücksichtigen. Die Nebenzeiten t_n setzen sich aus Wartezeiten zwischen zwei Eingriffen, zum Beispiel Bohrungen an einem Werkstück eines Werkzeuges zusammen. Es entsteht u. a. Wartezeit, um von einer Bearbeitungsmittel zur nächsten zu gelangen, wenn verschiedene Werkzeuge nacheinander in einer Arbeitsstation im Eingriff sind und wenn das Werkstück von einer Arbeitsstation zur nächsten transpor-

tiert wird. Die durchschnittliche Fertigungszeit je Werkstück t_e ergibt sich aus der anteiligen Rüstzeit t_r , der Nebenzeit t_n , der Hauptzeit t_h sowie der anteiligen Werkzeugwechselzeit t_w zu

$$t_e = \frac{t_r}{m_c} + t_n + t_h + \frac{t_w}{T} \cdot t_w \quad (3.4)$$

Bezogen auf eine Achtstundenschicht geht das Bestreben der Betreiber dahin, dass Werkzeuge nur einmal pro Schicht gewechselt werden müssen, sodass zum einen eine möglichst geringe Anzahl von Werkzeugwechseln und zum anderen nur zu Schichtbeginn Wartezeiten entstehen. Jedoch sind sowohl die Materialien der Werkstücke als auch die Werkzeugwerkstoffe und deren Beschichtungen dieser Entwicklung unterzogen, sodass die Schnittwertempfehlungen einer ständigen Änderung unterliegen und auf den jeweiligen Einsatzfall abzustimmen sind.

Unter der Voraussetzung eines konstanten Vorschubs, der zu maximieren ist, lässt sich der technisch interessante Bereich der Standzeitkurve einer Schneidstoff-Werkstückstoffpaarung, wie in Bild 3.4 dargestellt, durch eine Standzeitgerade nach

$$\log(T) = k_T \cdot \log(v_c) + \log(C_v) \quad (3.5)$$

annähern und durch Entlogarithmieren zur so genannten Taylorgleichung

$$T = C_v \cdot v_c^{k_T} \quad (3.6)$$

überführen /KöKI97/. Die in der Praxis häufig benutzte Darstellung

$$C_T = v_c \cdot T^{-\frac{1}{k_T}} \quad \text{bzw.} \quad v_c = T^{\frac{1}{k_T}} \cdot C_T \quad (3.7)$$

kann durch Umstellung der Gleichung (3.6) nach v_c erreicht werden, wobei

$$C_T = C_v \cdot \frac{1}{k_T} \quad (3.8)$$

ist. C_v und C_T bezeichnen die Schnittpunkte der Gerade mit den Koordinatenachsen, wobei C_v die Standzeit T bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 1\text{m/min}$ und C_T die Schnittgeschwindigkeit v_c bei einer Standzeit von $T = 1\text{min}$ ist.

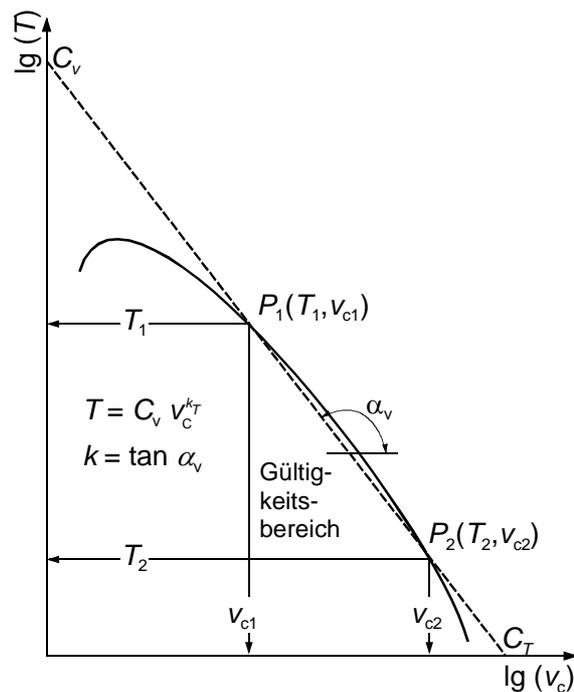


Bild 3.4 Einfluss der Schnittgeschwindigkeit v_c auf die Standzeit T /VDI 3321/

Es ist zu berücksichtigen, dass die Taylorgleichung nur im Schnittgeschwindigkeitsbereich angewendet werden kann, in dem die Standzeitkurve durch eine Gerade mit hinreichender Genauigkeit beschrieben wird, wobei k_T die Steigung der Geraden ($k_T = \tan \alpha_v$) angibt.

Die Standzeitgleichung beschreibt den Standzeitverlauf einer bestimmten, ausgewählten Schneidstoff-Werkstückstoff-Paarung in Abhängigkeit von den Schnittbedingungen, da bisher die Anzahl der unterschiedlichen Einflussparameter die Bestimmung einer nach physikalischen Gesetzmäßigkeiten abgeleiteten Funktion verhindert hat. Da die Modellvorstellungen aller bekannten Standzeitfunktionen auf empirisch ermittelten Standzeitkurven basieren, ist die Genauigkeit der Funktionen von der Übereinstimmung des Modells mit dem Standzeitverhalten der Schneidstoff-Werkstückstoff-Paarung abhängig.

Zur Bestimmung der Konstanten C_T und k_T sind mindestens zwei Versuchspunkte $P_1(T_1; v_{c1})$ und $P_2(T_2; v_{c2})$ bei konstantem Vorschub f_s notwendig, die im annähernd linearen Bereich der Standzeitkurve liegen müssen. Dieser Gültigkeitsbereich der von Taylor ermittelten Standzeitkurve ist wegen des gekrümmten Verlaufs u. a. von der Lage und der Größe des ermittelten Intervalls $[v_{c1}; v_{c2}]$ abhängig.

Die in der Gleichung enthaltene Konstante C_T beschreibt den Punkt, in dem die Ausgleichsgerade die Abszisse bei der Schnittgeschwindigkeit $v_c = 1$ m/min im doppeltlogarithmischen Koordinatensystem schneidet. Der Exponent k_T gibt die Steigung der Geraden an.

den an. Dabei ist die Lage der Standzeitgeraden von der Werkstoffpaarung des Werkstücks und des Werkzeugs abhängig, wodurch eine Extrapolation der ermittelten Standzeitwerte auf Werte außerhalb des Ermittlungsintervalls auf Kosten der Genauigkeit nur eingeschränkt möglich ist.

Bild 3.5 zeigt, grau unterlegt, die Streubereiche für die Schnittgeschwindigkeit und die Standzeit. Bei einer gewählten mittleren Schnittgeschwindigkeit $v_{c\mu}$ unterliegt die erreichte Standzeit einer möglichen Abweichung, die Rückschlüsse auf die Eintrittswahrscheinlichkeit des Standzeitkriteriums zulässt. Analog wird eine geforderte Standzeit T_μ durch eine Schnittgeschwindigkeit erzielt, die in einem vorgegebenen Streubereich liegt.

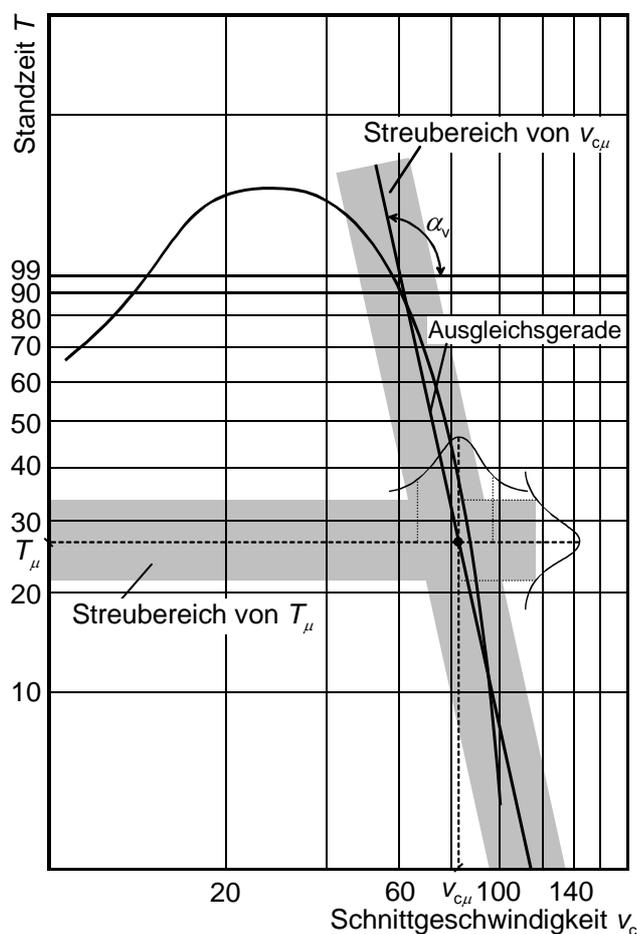


Bild 3.5 Streubereich der Standzeit in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit

Zur Erstellung einer Standzeitgeraden werden unter Berücksichtigung des Zufallscharakters der Standzeit mehrere Versuche bei verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten v_c durchgeführt, um die zu erreichenden mittleren Standzeiten T_μ mit deren Streuung σ_T zu bestimmen. In heutigen Bearbeitungszentren ist es auf Grund der exakten Steuerung, kombiniert mit leistungsstarken Motoren, möglich, die gewählte Schnittgeschwindigkeit einzuhalten, um die Streuung der Standzeit zu ermitteln.

Dabei müssen die Schnittgeschwindigkeiten v_{c1} und v_{c2} , wie in Bild 3.4 dargestellt, eine ausreichende Differenz aufweisen. Die so ermittelte Standzeitgerade, deren Lage durch C_μ bestimmt ist, besitzt eine Eintrittswahrscheinlichkeit, gemessen am Standzeitkriterium, von 50 %. Wird die mittlere Standzeit T_μ um den Wert σ_T reduziert, so wird bei gleicher Schnittgeschwindigkeit die reduzierte Standzeit $T_\mu - 1\sigma_T$ mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 84,1 %, bei einer Reduzierung um den Wert $2\sigma_T$ mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,7 % erreicht.

In Bild 3.6 ist dem rechten Bildbereich, der die Standzeitgerade mit der Standzeit T [min] über die Schnittgeschwindigkeit v_c [m/min] zeigt, parallel ein Wahrscheinlichkeitsdiagramm angefügt worden, anhand dessen die Wahrscheinlichkeit für das Erreichen der Standzeit ermittelt werden kann.

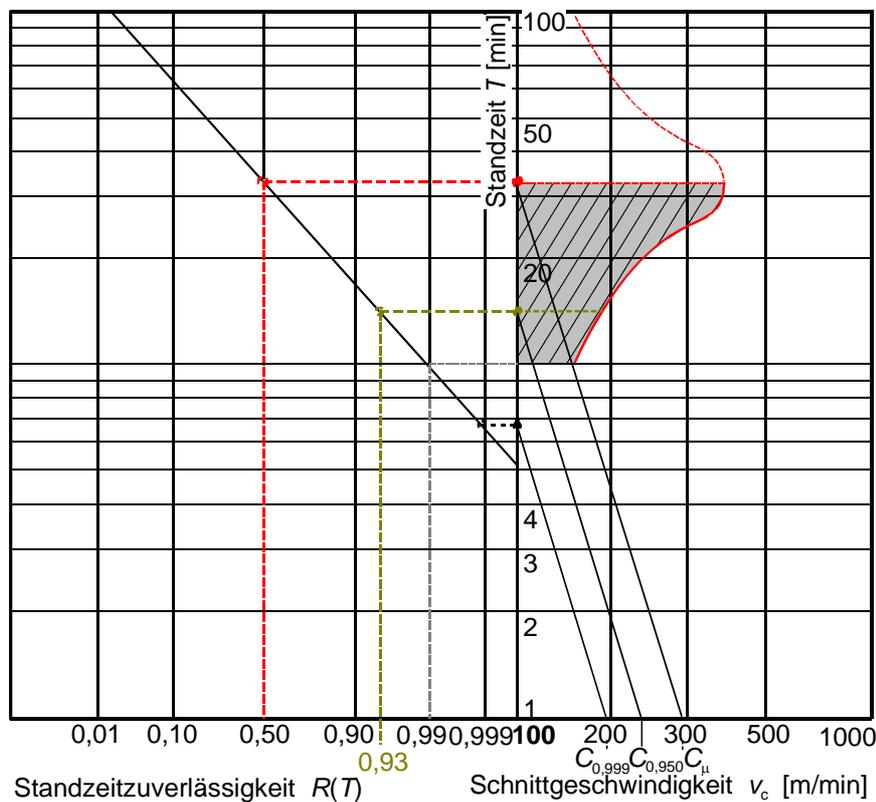


Bild 3.6 Standzeitzuverlässigkeit als Lognormal-Verteilungsfunktion im T - v_c -Diagramm in Anlehnung an /Vos76, Tön95/

3.2.1 Erweiterte Standzeitgleichung

Der Einfluss des Vorschubs f_s kann bei der Standzeitermittlung mit einbezogen werden, indem die Taylorgleichung entsprechend

$$T = C_T \cdot v_c^{k_T} \cdot f_s^i \quad (3.9)$$

erweitert wird. Dabei besitzt der Exponent i des Vorschubs f_s ein negatives Vorzeichen und ist kleiner als der Exponent k_T der Schnittgeschwindigkeit v_c .

3.3 Optimierung der Schnittwerte zur Steigerung des Outputs

Eine Optimierung der Zerspanbedingungen an Bearbeitungsanlagen kann durch adaptive Regelsysteme während des Bearbeitungsprozesses ermöglicht werden. Während der Bearbeitung werden selbstständig Kennwerte des Zerspanprozesses aufgenommen und online einem Prozessrechner zugeführt, der nach einem vorgegebenen Rechenmodell die eventuell erforderliche Veränderung der Schnittbedingung ermittelt und diese der Hauptsteuerung mitteilt [Opitz70]. Niedrige Schnittbedingungen bewirken hohe Standzeiten und führen über eine Reduzierung der Werkzeugwechsel zu niedrigen Werkzeugkosten, aber auch zu einer Verringerung der Ausbringung und somit zu hohen Maschinenkostenanteilen pro Werkstück [Opitz70].

3.3.1 Bestimmung der zu erwartenden Standzeit und angemessenen Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit zum Erreichen der erforderlichen Standzeit

Die hohen Kapitalkosten numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen setzen sich aus dem Anschaffungspreis und den Betriebskosten (Life Cycle Costs) zusammen. Der Anschaffungspreis kann einmalig beim Einkauf reduziert werden, wohingegen optimale Zerspanungsbedingungen über die gesamte Einsatzzeit die Betriebskosten beeinflussen. Wie schon in Bild 1.3 gezeigt, haben der auftretende Werkzeugverschleiß, die damit verbundene Instandhaltung der Werkzeuge und die Koordination der Werkzeugwechsel an den einzelnen Stationen hat bedeutenden Einfluss auf die Ausbringung einer TL.

Durch eine zuverlässigkeits-adaptive Regelung kann der Werkzeugverschleiß über eine Anpassung der vorgegebenen Schnittwerte so geregelt werden, dass der erforderliche Werkzeugwechsel zur vorgegebenen Zeitpunkt der Werkzeugwechsel-Strategie durchgeführt wird. Bei dieser Grenzwert- und Optimalwertregelung wird die Bestimmung des Werkzeugverschleißes und des Verschleißzuwachses durch Beobachtung der Kenngrößen Spindelmoment und Schnittkraftschwankung erreicht.

Bei den Schnittwerten an den einzelnen Stationen einer TL handelt es sich um vorgegebene Werte der Werkzeughersteller, die hinsichtlich der Bearbeitungsqualität, der Standzeit und einer Werkzeugwechsel-Strategie optimiert werden. Da die Schneidhal-

tigkeit der Werkzeuge durch ihre Normbezeichnung nicht eindeutig angegeben ist und die Streuungen der Zerspanbarkeit der Werkstoffe gleicher Normbezeichnungen sehr groß sein können, ist es während der Inbetriebnahme erforderlich, empirisch optimale Schnittwerte zu ermitteln. Zusätzliche Wartungszeiten entstehen, weil Abweichungen von der Werkzeugwechsel-Strategie nach der Inbetriebnahme meist weder kontrolliert noch korrigiert werden.

Bei einer zuverlässigkeits-adaptiven Regelung wird zur Bestimmung von optimalen Schnittwerten das Motor-Drehmoment während der Bearbeitung in festgelegten Abständen aufgenommen und in einem Rechner hinterlegt. Anschließend werden aus einer ausreichenden Datenbasis zu den verschiedenen Zeitpunkten die Mittelwerte der Motor-Drehmomente gebildet. Überschreitet der aktuelle Kennwert zum Zeitpunkt t_{ci} einen vorgegebenen Grenzwert relativ zum Mittelwert aller zuvor gemessenen Kennwerte zum Zeitpunkt t_{ci} , so können zum Erhalt der Werkzeugwechsel-Strategie, das heißt zum Erreichen der vorgegebenen Standzeit T_{nom} , die optimalen Schnittwerte unter Berücksichtigung der Abweichung bestimmt und die Schnittkraft durch Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit verringert werden.

Die Schnitttiefe a_p hat nach /VDI 3321/ keinen nennenswerten Einfluss auf die Größe des Verschleißes und ist in den durchgeführten Versuchen mit $a_p = 5,25$ mm konstant gehalten worden. Der Einfluss der Schnittzeit kann als unabhängig von Vorschub und Schnittgeschwindigkeit angenommen werden, im Gegensatz dazu nimmt der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf den Freiflächenverschleiß mit wachsendem Vorschub ab, der Einfluss des Vorschubes sinkt mit größer werdender Schnittgeschwindigkeit /Deg68; VDI 3321/. Der Werkzeugverschleiß VB kann nach /Deg68/ mit der Gleichung

$$VB = A \cdot t_c^{b_1} \cdot v_c^{b_2} \cdot f_s^{b_3} \quad (3.10)$$

bestimmt werden.

Auf Grund von durchgeführten Versuchen hat /Deg68/ festgestellt, dass der Exponent b_1 vernachlässigbar weder vom Vorschub f_s noch von der Schnittgeschwindigkeit v_c beeinflusst wird und für die eingesetzte Werkstoff-Schneidstoff-Paarung ein mittlerer Wert von 0,85 angenommen werden kann.

Da b_2 und b_3 nicht konstant, sondern Funktionen der Schnittgeschwindigkeit v_c und des Vorschubs f_s sind, ist die Ermittlung des Werkzeugverschleißes ungenau. Auf Grund seiner Analysen nimmt /Deg68/ den Einfluss der Schnittzeit t_c als unabhängig von Schnittgeschwindigkeit und Vorschub an. Allerdings verringert sich mit wachsendem

Vorschub der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf den Freiflächenverschleiß VB und mit steigender Schnittgeschwindigkeit sinkt der Einfluss des Vorschubs.

Da die Rechnungen durch abhängige Exponenten wesentlich erschwert werden und bei einer Prozessregelung die durch Benutzung konstanter Exponenten entstehenden Fehler systembedingt aufgehoben werden, soll jedoch für spätere Anwendungen der Verschleißgleichung von konstanten Exponenten ausgegangen werden.

In der erweiterten Taylorgleichung (3.9) nach /Mil92/ wird zur Berechnung der Standzeit neben der Schnittgeschwindigkeit v_c mit dem Exponenten $k_T = -b_3 / b_1$ auch der Vorschub f_s mit dem Exponenten $i = -b_2 / b_1$ einbezogen, wobei die Exponenten k_T und i nicht konstant sind.

Bild 3.7 zeigt den theoretischen Verlauf des Freiflächenverschleißes während der Werkzeugstandzeit bei zweimaliger Änderung der Schnittgeschwindigkeit. Dabei wächst der Verschleiß bis zum Zeitpunkt t_{c1} entsprechend der vorgegebenen Schnittgeschwindigkeit v_{c1} an. Wird nun nach einer Schnittzeit die Schnittgeschwindigkeit von v_{c1} auf v_{c2} gesenkt, so erfolgt der weitere Verschleißzuwachs nach den Gesetzmäßigkeiten der Schnittgeschwindigkeit v_{c2} ausgehend von der bis hierher erreichten Verschleißmarkenbreite VB_1 . Der Anfangspunkt für das zweite Schnittzeitintervall t_{c1} bis t_{c2} liegt jedoch im Punkt $(t_{c11}; VB_1)$, während erst eine Schnittzeit von t_{c1} zurückgelegt worden ist. Nach einer Gesamtschnittzeit t_{c2} errechnet sich der Verschleiß nach der Summe

$$VB_2 = A \cdot f_s^{b_2} \cdot \left(t_{c1}^{b_1} \cdot v_{c1}^{b_3} + (t_{c21}^{b_1} - t_{c11}^{b_1}) \cdot v_{c2}^{b_3} \right). \quad (3.11)$$

Eine Veränderung des Vorschubs kann ebenfalls durch die aufgestellten Gleichungen berücksichtigt werden. Als allgemeine Form für den Freiflächenverschleiß ergibt sich dann

$$VB_n = A \cdot \sum_{i=1}^n i \cdot \sum_{j=0}^{n-1} j \cdot \left(t_{cij}^{b_1} - t_{c(j-1)i}^{b_1} \right) \cdot f_{si}^{b_2} \cdot v_{ci}^{b_3}. \quad (3.12)$$

Durch Zerspanungsversuche, bei denen die Schnittbedingungen während der Standzeit verändert wurden, hat Degenhardt /Deg68/ diese theoretischen Überlegungen bestätigt. Der Gesamtverschleiß lässt sich bei Änderungen der Schnittbedingungen nur durch Summierung der Teilbeträge während einzelner Schnittzeitperioden berechnen, da der Verschleiß bei Änderung der Schnittbedingungen unstetig wird.

Beim Aufbau einer Optimalwertregelung für die Zerspanung ist zur Führung des Zerspanungsprozesses die Bestimmung des Werkzeugverschleißes bzw. des Verschleißzuwachses eine der wichtigsten Aspekte.

In Bild 3.7 wird davon ausgegangen, dass der Verschleiß VB_1 nach einer bestimmten Schnittzeit t_{c1} einen höheren Wert erreicht, als er entsprechend Gleichung (3.12) mit der Schnittgeschwindigkeit v_{c1} hätte erreichen müssen. Bei Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit von v_{c1} auf v_{c2} ist ein möglicher Verlauf des Freiflächenverschleißes gestrichelt ab dem Zeitpunkt t_{c1} über den Zeitpunkt t_{c2} bis zur erwartenden Standzeit T_2 dargestellt. Dabei werden im Intervall $[t_{c1}; t_{c2}]$ die Verschleißwerte VB_1 zum Zeitpunkt t_{c1} und VB_2 zum Zeitpunkt t_{c2} gemessen.

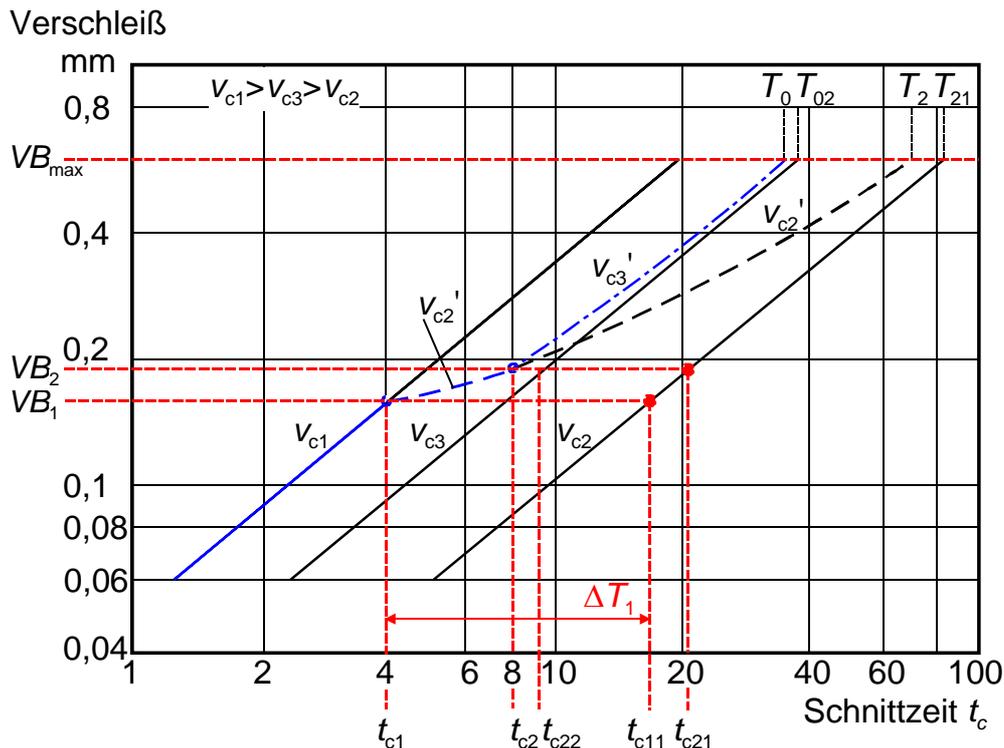


Bild 3.7 Verlauf des Freiflächenverschleißes bei Änderung der Schnittgeschwindigkeit in Anlehnung an /Deg68/

Im Folgenden wird die Ermittlung der zu erwartenden Standzeit T_2 und die angemessene Änderung der Schnittgeschwindigkeit von v_{c2} nach v_{c3} zum Erreichen der geforderten Standzeit T_0 für die restliche Schnittzeit beschrieben.

Für den allgemeinen Fall zeigt Bild 3.7, wie die Verschleißgerade der Schnittgeschwindigkeit v_{c2} gefunden werden kann. Wird vorausgesetzt, dass die Steigung der Verschleißgeraden mit b_1 konstant ist, müssen die Zusammenhänge

$$T_{21} - T_2 = t_{c21} - t_{c2} \quad (3.13)$$

und

$$t_{c21} - t_{c2} = t_{c11} - t_{c1} \quad (3.14)$$

erfüllt sein. Somit können die Abhängigkeiten der einzelnen Teilabschnitte der Verschleißgeraden v_{c2} mit

$$VB_1 = C_1 \cdot t_{c11}^{b_1} \cdot v_2^{b_3}, \quad (3.15)$$

$$VB_2 - VB_1 = C_1 \cdot (t_{c21}^{b_1} - t_{c1}^{b_1}) \cdot v_2^{b_3}, \quad (3.16)$$

$$VB_{\max} = C_1 \cdot (T_{21}^{b_1} - t_{c11}^{b_1}) \cdot v_2^{b_3} \quad (3.17)$$

beschrieben werden (Bezeichnungen nach /Deg68/, siehe Gleichungen (3.10)). Die auf Grund des Verschleißzuwachses zu erwartende Standzeit kann durch Auflösen der Gleichungen (3.13) bis (3.17) nach T_2 bestimmt werden; es gilt

$$T_2 = t_{c1} + (t_{c1} - t_{c1}) \cdot \frac{\left(\frac{VB_{\max}}{VB_1}\right)^{\frac{1}{b_1}} - 1}{\left(\frac{VB_2}{VB_1}\right)^{\frac{1}{b_1}} - 1}. \quad (3.18)$$

Wird die Standzeit T_0 als Sollwert angestrebt, muss bei der in Bild 3.7 erkennbaren Differenz zwischen T_2 und T_0 eine Anpassung der Schnittgeschwindigkeit von v_{c2} auf v_{c3} vorgenommen werden, damit eine *Punktlandung*, siehe Kapitel 6 Abschnitt 6.2 und Kapitel 7, auf die Standzeit T_0 erreicht wird. Ein möglicher Verlauf des Freiflächenverschleißes ist ab dem Zeitpunkt t_{c2} bis zur geforderten Standzeit T_0 strichpunktiert dargestellt. Das in Bild 3.7 dargestellte graphische Verfahren zur Bestimmung der Verschleißgeraden für v_{c3} kann durch die Beziehung

$$T_{02} - T_0 = t_{c22} - t_{c2} \quad (3.19)$$

ausgedrückt werden.

Für den Verschleißzuwachs von VB_2 nach VB_{\max} gilt bei der Schnittgeschwindigkeit v_{c3}

$$\frac{T_{02}}{t_{c22}} = \left(\frac{VB_{\max}}{VB_2}\right)^{\frac{1}{b_1}}. \quad (3.20)$$

Durch Auflösen von Gleichung (3.19) nach t_{c22} und Einsetzen in Gleichung (3.20) kann die zu erwartende Standzeit T_{02} entsprechend

$$T_{02} = \frac{t_{c2} - T_0}{\left(\frac{VB_2}{VB_{\max}}\right)^{\frac{1}{b_1}} - 1} \quad (3.21)$$

ermittelt werden. Bei Anwendung der Schnittgeschwindigkeit v_{c2} ergibt sich

$$T_{21} = \frac{t_{c2} - T_2}{\left(\frac{VB_2}{VB_{\max}}\right)^{\frac{1}{b_1}} - 1} \quad (3.22)$$

Die Beziehung zwischen v_{c2} und v_{c3} kann durch

$$C_1 \cdot T_{21}^{b_1} \cdot v_{c2}^{b_3} = C_1 \cdot T_{02}^{b_1} \cdot v_{c3}^{b_3} \quad (3.23)$$

beschrieben werden. Wenn für die theoretischen Standzeiten T_{21} und T_{02} in Gleichung (3.23) die Werte der Gleichungen (3.21) und (3.22) eingesetzt werden, kann die Schnittgeschwindigkeit v_{c3} als Funktion von v_{c2} wie folgt

$$\left(\frac{t_{c2} - T_2}{\left(\frac{VB_2}{VB_{\max}}\right)^{\frac{1}{b_1}} - 1}\right)^{b_1} \cdot v_{c2}^{b_3} = \left(\frac{t_{c2} - T_0}{\left(\frac{VB_2}{VB_{\max}}\right)^{\frac{1}{b_1}} - 1}\right)^{b_1} \cdot v_{c3}^{b_3} \quad \Rightarrow \quad (3.24)$$

$$v_{c3} = v_{c2} \cdot \left(\frac{T_2 - t_{c2}}{T_0 - t_{c2}}\right)^{\frac{b_1}{b_3}} \quad (3.25)$$

ermittelt werden. Das Standzeitkriterium VB_{\max} wird mit der berechneten Schnittgeschwindigkeit v_{c3} bei konstantem Verschleißzuwachs nach der Schnittzeit T_0 erreicht.

Der dargestellte Rechengang zeigt, dass bei einer Optimalwertregelung der Werkzeugverschleiß als aussagefähiger Zuverlässigkeits-Kriterium zur Beurteilung und optimalen Führung des Zerspanungsprozesses angewendet werden kann /Deg68/.

3.4 Auswirkungen des Verschleißes

Verschleiß ist definiert als ein fortschreitender Materialverlust aus der Oberfläche eines Körpers, der durch mechanische Ursachen, das heißt Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers hervorgerufen wird /DIN 50320/. Die in Tabellen für unterschiedliche Werkstoffe angegebenen Werte der spezifischen Schnittkraft k_c sind für arbeitsscharfe Werkzeuge aufgestellt worden /Dub90/.

3.5 Festlegung der maximalen Verschleißmarkenbreite als Standzeitkriterium

Ein Standzeitkriterium ist die quantitative Begrenzung des Verschleißes auf Span- bzw. Freifläche. Es gibt an, wann ein Werkzeug ausgewechselt und nachgeschliffen werden muss. Bei der Schrupp- und Schlichtbearbeitung von Stahl mit Hartmetallwerkzeugen wird als Verschleißkriterium der Freifläche $VB_{\max} = 0,8 \text{ mm} \dots 1,0 \text{ mm}$ angenommen

und für die Endbearbeitung wird VB_{\max} nicht größer als 0,2 mm ... 0,4 mm gewählt /WeLo86/.

Bei geringem Einstellwinkel findet das Spanen im Bereich der Schneideckenrundung statt. Die somit erreichte lange Schneidkante und der stark negative Spanwinkel erzeugen, wie Bild 3.8 zeigt, eine zwei bis dreifache Passivkraft F_p verglichen mit der Schnittkraft F_c , die im Vergleich zur Vorschubkraft F_f noch etwas höher ist. Auf Grund von Kühl-Schmier-Stoffen, Vibrationen und ähnlichen Einflüssen auf das direkte Messsystem ist eine aufwendige Kapselung bzw. Abschirmung des Messsystems notwendig, so dass der Werkzeugverschleiß oder -bruch meist indirekt über die Wirkleistung des Antriebmotors gemessen wird. Unterschiedliche Verfahren zur Verschleißdiagnose werden im nächsten Kapitel vorgestellt.

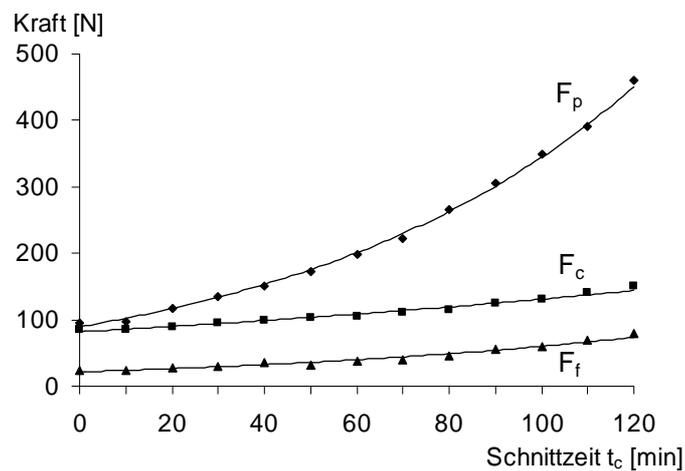


Bild 3.8 Kraftanstieg bei fortschreitender Schnittzeit t_c /Tön95/

4 Verschleißüberwachung und -diagnose von Werkzeugen

Während der Planungsphase einer Transferlinie werden die kritischen Werkzeugstandzeiten analysiert. Falls erforderlich werden mit dem standzeitkritischen Werkzeug und dem zu bearbeitenden Werkstoff Zerspanungsversuche durchgeführt, um frühzeitig Zerspanungs- und Standzeitproblemen durch eine gezielte Auswahl von Schneidmaterialien und der Festlegung von Schnittwertgrenzen entgegenzuwirken. Damit werden grundlegende Probleme frühzeitig erkannt und der Werkzeughersteller ist in der Lage mit seiner Erfahrung in Bezug auf Schneidmaterialien, Hartmetallsorten und Beschichtungen Änderungen zur Optimierung der Standzeit vorzunehmen. Jedoch ist die Anzahl der Standzeitversuche für das ausgewählte Werkzeug häufig nicht groß genug, um gesicherte statistische Aussagen über die Standzeit der gewählten Werkstückstoff-Schneidstoff-Kombination treffen zu können. Da öfter die Zusammensetzung und Vorbearbeitung (zum Beispiel Schmieden oder Gießen) des im Standzeitversuch verwendeten Werkstückstoffs nicht exakt den Eigenschaften des tatsächlichen Werkstücks entsprechen und die Versuche zeitlich stark begrenzt sind, können keine gesicherten Kenntnisse über Schwankungen der Zusammensetzung oder der Härte oder über die Qualität (Lunker) des Werkstückstoffs gewonnen werden.

Aus diesen Gründen werden erst in der Inbetriebnahmephase die Zyklen der Werkzeugwechsel an den einzelnen Arbeitsstationen auf der Basis empirisch gewonnener Standzeiten in Form einer starren Werkzeugwechselstrategie in die Hauptsteuerung der Transferlinie implementiert. Da in den Arbeitsstationen unterschiedliche Bearbeitungen wie Fräsen, Bohren oder Gewinden durchgeführt werden, sind die wirkenden Werkzeugbelastungen und somit auch die Standzeiten der Werkzeuge unterschiedlich.

In diesem Kapitel wird dargestellt, welche technischen Überwachungshilfsmittel entwickelt und eingesetzt werden, um insbesondere einen zufälligen Werkzeugbruch, der einen Totalausfall des Werkzeugs und einen ungeplanten längeren Stillstand der Transferlinie bedeutet, zu vermeiden.

Der Entwicklung der *Werkzeugbruchüberwachung* folgt die Entwicklung der *Verschleißüberwachung* des Werkzeugs. Diese Entwicklungen haben alle zum Ziel, die Stillstandszeiten einer Transferlinie auf Grund von Problemen der Zerspanung oder auch nur aufgrund von Werkzeugwechsel zu reduzieren, da in diesen Fällen die Verfügbarkeit des gesamten Systems beeinträchtigt wird und wegen des Werkzeugwechsels an einer Arbeitsstation die gesamte Produktion stillsteht.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, das Werkzeug zu überwachen, damit kein Werkzeugbruch entsteht oder um die Belastung auf das Werkzeug und somit den Verschleißzustand beziehungsweise den Standzeitrest zu verfolgen.

Als Werkzeugverschleiß wird die Abnutzung des unter Schnitt stehenden Schneidteils des Werkzeugs durch die mechanischen und thermischen Beanspruchungen während des Schnitts bezeichnet. Es wird versucht, für die Verschleißgrößen ein einheitliches Bezugssystem aufzustellen, das den international gebräuchlichen Bezeichnungen entspricht. Gleichzeitig wird auch eine einheitliche Festlegung der Abkürzungen vorgeschlagen /ISO 3685/.

Bei der Überwachung technischer Prozesse müssen häufig Prozesseigenschaften, das heißt Wirkgrößen eines Prozesses, deren direkte Messung nicht möglich ist, analysiert werden. In diesem Fall werden messbare Hilfsgrößen, so genannte Prozessgrößen, die mit den gesuchten Eigenschaften korrelieren, kontinuierlich erfasst. Mit Hilfe eines geeigneten Modells zur Interpretation der Prozessgrößensignale müssen dann Rückschlüsse auf die gesuchten Prozesseigenschaften gezogen werden. Deshalb wird dieses Verfahren als *indirekte Überwachung* bezeichnet.

Derartige Aufgabenstellungen sind meist dadurch charakterisiert, dass der Prozess nicht nur durch verschiedenste Parameter, sondern auch durch teilweise erhebliche Störungen beeinflusst ist und deshalb oft mehrere Prozessgrößen zur Überwachung benötigt werden. Das Prozessverhalten ist häufig nichtlinear und dynamisch, wobei jedoch genaue funktionale Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsgrößen des Prozesses nicht oder nur teilweise bekannt sind. Das Verhalten kann in diesem Fall nur exemplarisch beschrieben werden, das heißt durch Beobachtungen einzelner Sequenzen von Ein- und entsprechenden Ausgangsgrößen des realisierten Prozesses. Zur Interpretation der Prozessgrößensignale in derartigen Aufgabenstellungen sind Neuronale Netze sehr gut verwendbar, wenn geeignete Verfahren zur Aufbereitung der Eingangsinformation dieser Netze eingesetzt werden /Sic00/.

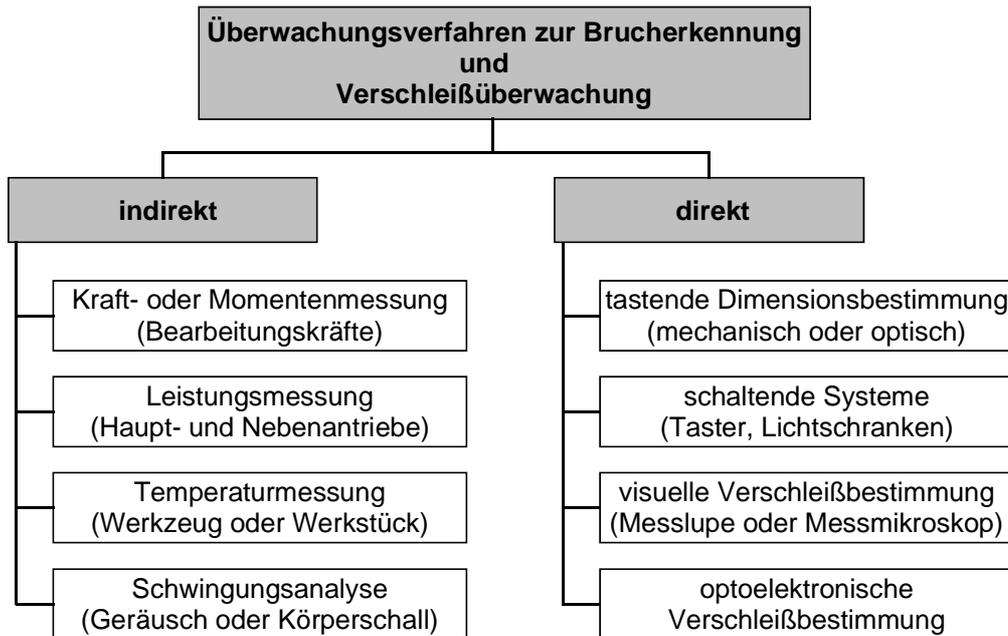


Bild 4.1 Werkzeugüberwachungsverfahren /Gut97/

Bei *indirekten Verfahren* zur Werkzeugüberwachung werden, wie in Bild 4.1 dargestellt, Hilfsgrößen erfasst, um entsprechend einer Korrelation den Werkzeugzustand bestimmen zu können /Gut97/. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist der erforderliche Aufwand bei der Erfassung von statistisch ausreichenden Technologiedaten zur Ermittlung der Korrelation. Zudem wird das Ergebnis der experimentellen Standzeitermittlung durch schwankende Werkstoffeigenschaften, Maßtoleranzen, thermische Einflüsse und durch Reibung sowie Ungenauigkeiten in der Übertragungskette beeinflusst. Allerdings ist bei ausreichend hoher Maschinenausnutzung die Streuung der Standzeitwerte akzeptabel, da das Nutzsignal von störenden Effekten getrennt werden kann und sich die Korrelation zwischen Verschleiß- und Kraftentwicklung in Abhängigkeit von der Zeit nachweisen lässt. In der Anwendung wird das indirekte Verfahren der *Wirkleistungsmessung* mit integrierter Umrechnung der Drehmoment-Messung auf Grund des Vorteils der einfachen Implementierung genutzt, da sich andere Messverfahren im betrieblichen Alltag wegen der Umgebungsbedingungen bisher nicht bewährt haben. Ein weiterer Vorteil der indirekten Verfahren, insbesondere der Wirkleistungsmessung, ist der Einsatz während des Bearbeitungsprozesses als In-Prozessmessung. Da während des Bearbeitungsprozesses die Verschleißstelle nicht einsehbar ist, sind die direkten Verfahren im Allgemeinen Post-Prozessmessungen.

In /FrKi93/ wird die Prozessüberwachung durch Fehlerdiagnose beschrieben, wobei zur Verbesserung der Überwachung analytische Zusammenhänge zwischen den zu über-

wachenden Größen zur Fehlerdiagnose herangezogen werden. Ein Diagnosesystem dieser Art besteht im Wesentlichen aus drei Komponenten:

- dem mathematischen Modell
- dem Residuengenerator und
- der Residuenauswertung mit Schwellwertentscheidung.

Das Verfahren läuft in den folgenden Schritten ab:

1. Die Daten eines aktuellen, realen Prozesses werden mit den im Rechner simulierten Daten verglichen.
2. Die Daten des realen Prozesses werden durch die Residuengenerierung auf die Daten des Modells angepasst.
3. Im fehlerfreien Idealfall und bei exakter Kenntnis des Modells ist das Residuum gleich Null und nur wenn ein Fehler im Prozess auftritt, nimmt das Residuum einen von Null verschiedenen Wert an.

Die Verfahren zur Residuenauswertung können unterschiedlich sein, wobei sie alle zum Problem des Schwellwertvergleichs des Residuums oder einer aus dem Residuum gebildeten Entscheidungsfunktion führen /FrKi93/.

In /Wals92/ wird dargestellt, dass es möglich ist, nur aus den gemessenen Strömen, Spannungen und Drehzahlen des Hauptantriebes eines Bearbeitungszentrums den aktuellen Maschinen- und Verschleißzustand zu bestimmen. Hiermit kann nach jeder Bohrung der Verschleißzustand eines Werkzeugs ermittelt werden, um einen rechtzeitigen Werkzeugwechsel zu veranlassen.

Bei dieser Methode spielen vor allem dynamische Prozessmodelle eine Rolle, durch die die Informationen mehrerer Messgrößen verknüpft werden. Es wird ein Modell beschrieben in dem, bei gleich bleibenden Schnittbedingungen, Veränderungen eines definierten Parameters eine Erhöhung des geforderten *mittleren* Schnittmomentes und so den damit verbundenen zunehmenden Verschleiß an der Schneide erkennen lassen.

Die dargestellten analytischen Prozessmodelle beschreiben das Prozessverhalten kontinuierlich. Für Modelle mit Signalen in kontinuierlicher Zeit zur Ermittlung der Prozessparameter ist eine Parameterschätzung durchzuführen, da Modelle mit zeitdiskreten Signalen in Form von Differentialgleichungen nicht geeignet sind.

Frühzeitiges Erkennen des Ratterns ist durch Vergleichsmessungen von Signalen möglich, die zum einen über Dehnmessstreifen an der Spindel und über induktive Aufnehmer am Support erfasst werden. Durch gleichzeitige Erfassung des statischen Drehmomentanteils kann die Vorschubgeschwindigkeit so geregelt werden, dass einerseits

das zulässige Drehmoment, bezogen auf die Maschinenleistung, voll ausgenutzt wird und andererseits eine maximal zulässige Schneidenbelastung durch Vorgabe einer Vorschubgeschwindigkeitsbegrenzung nicht überschritten wird /OpKö70/.

Die Produktivität kann in vielen Fällen durch eine solche Grenzregelung erheblich gesteigert werden. Jedoch wird bei dieser Grenzregelung eine Streuung des Verschleißes zu einem beliebigen Zeitpunkt unberücksichtigt gelassen. Hinsichtlich des Ziels, eine bestimmte, vorgewählte Standzeit zu erreichen, kann eine adaptive Regelung, welche die Streuung des Verschleißes zu bestimmten Zeitpunkten berücksichtigt, die Grenzregelung unterstützen.

4.1 Thermische Überwachungsmethode

Da die thermische Belastung eines Werkzeuges mitbestimmend für seinen Verschleiß ist, liegt es nahe, die Beziehungen zwischen der Schnitttemperatur und dem Verschleiß zu formulieren /Lan49/. Lowack wies für mittlere Schnitte nach, dass sich mit der Einmeißelmethode beim Drehen kein wesentlicher Einfluss des Verschleißes auf die Schnitttemperatur feststellen lässt. Opitz, König et al. haben den Einfluss des Verschleißes auf die Schnitttemperatur bei sehr großen VB bis ca. 0,7 mm analysiert, wobei sie feststellten, dass sich der geringe Temperaturanstieg nicht zur indirekten Verschleißmessung heranziehen lässt /OpKö70/.

Durch den Einsatz von Strahlungsmessgeräten bzw. durch Infrarot-Photographie können die Temperaturen an Werkzeug, Werkstück und Span über die Bestimmung der Infrarotstrahlung gemessen werden. Im Gegensatz zur Infrarot-Photographie ermöglicht die Fernseh-Thermographie die zeitlich unmittelbare Aufzeichnung von Temperaturfeldern auf der Grundlage der Wärmestrahlungsmessung, wobei die Auswahl eines bestimmten Verfahrens von der jeweiligen Anwendung abhängt. Häufig ist bei relativ großem Versuchsaufwand die Genauigkeit zahlreicher Messverfahren nur mäßig /ViMüOp82, Wec95/. Die Bild 4.2 zeigt einen Bohrer beim Austritt aus dem Werkstück mit einer in der Schnittzone gemessenen maximalen Temperatur im Bereich von 330° C bis 360° C.

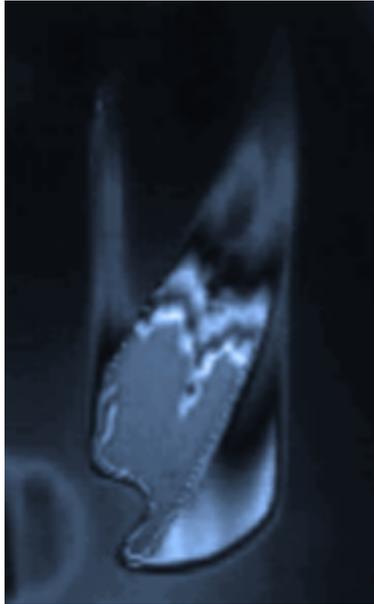


Bild 4.2 Thermographie eines Bohrers beim Austritt aus dem Werkstück (Aufnahme des Autors)

4.2 Schwingungs- oder Schallemissionsanalyse

Eine weitere Methode zur Überwachung des Bearbeitungsprozesses beim Bohren ist die zerstörungsfrei arbeitende und den Prozess nicht beeinflussende Schallemissionsanalyse. Bei der Schallemissionsanalyse wird der Körperschall an der Maschine gemessen und beim Überschreiten eines festgelegten Grenzwertes kann ein Werkzeugbruch vermieden oder eine Verschleißüberwachung des Werkzeugs durchgeführt werden. Der Schallsensor sollte an der Spannvorrichtung des Werkstücks oder am Werkzeugadapter montiert werden. Ein Nachteil dieser Methode liegt in der Empfindlichkeit des Schallsensors bei ungünstigen Umgebungsbedingungen wie zum Beispiel durch Kühlschmierstoffe. Die Schallemission entsteht beim Zerspanen durch plastische Verformung im Werkstück und durch bearbeitungsspezifische Vorgänge, die im Werkstoff Gitterschwingungen hervorrufen, die von einem piezoelektrischen Empfänger in elektrische Signale umgewandelt und anschließend weiterverarbeitet werden können.

Der fortschreitende Verschleiß bewirkt eine Veränderung der Bearbeitungsrandschicht, die wiederum eine deutlich erkennbare Veränderung der Schallemission zur Folge hat. Das Schallemissionssignal in Bild 4.3 links zeigt einen relativ kontinuierlichen Verlauf mit leichtem Anstieg zum Ende der Bohrung. Wohingegen der sprunghafte Anstieg des Schallemissionssignals S in Bild 4.3 rechts zeigt, dass sich die Spannungsbedingungen auf Grund der Kühlmitteldruckerhöhung von 10 bar auf 50 bar zur Bohrungsmitte ändern.

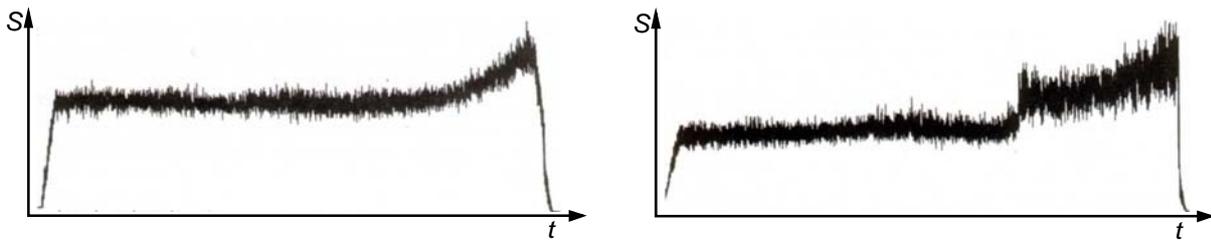


Bild 4.3 Effektivwert der Schallemission beim Bohren ins volle Material; (links) 10 bar, (rechts) 50 bar Druck Innenkühlung /Sch94/

Der große Kühlmitteldruck führt zu einer intensiveren Abkühlung der Schnittzone, und somit zu einer Erhöhung der verfestigten Zone um $10 \mu\text{m}$ in der Bearbeitungsrand-schicht. Bild 4.4 links zeigt den ersten und rechts den neunten Schnitt als Effektivwerte der Schallemissionsanalyse, wobei mit fortschreitendem Verschleiß die Amplitude zunimmt und das Schallemissionssignal stärker streut /Sch94/.

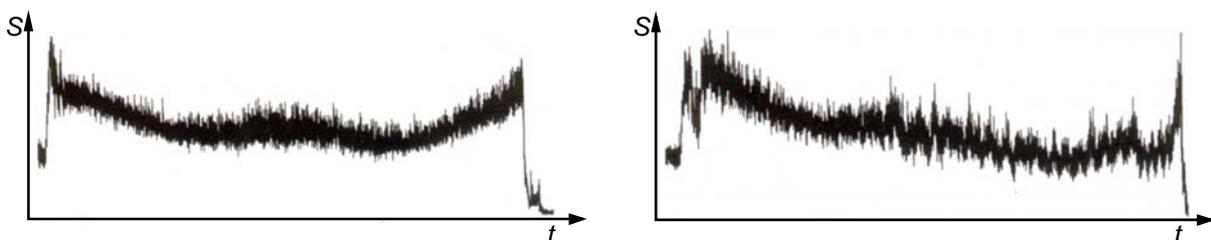


Bild 4.4 Effektivwert der Schallemission beim Ausbohren; (links) 1. Schnitt (rechts) 9. Schnitt /Sch94/

Mit der Schallemissionsanalyse ist eine aussagefähige Analyse des Zerspanungsprozesses während der Bearbeitung möglich, jedoch ist diese Methode in der industriellen Praxis nur bedingt einsatzfähig, insbesondere wenn der Empfänger wie bei den dargestellten Analysen auf jedes zu bearbeitende Werkstück befestigt werden muss.

4.3 Wirkleistungsüberwachungsmethode

Neben dem Verfahren der *Drehmomentmessung* direkt an der Werkzeughalterung, bei der Dehnungsmessstreifen (DMS) auf den Werkzeughalter appliziert werden und somit das bei der Bearbeitung entstehende Drehmoment durch DMS-Signale berührungslos an eine Rotorelektronik weitergeleitet wird, ist besonders die *Wirkleistungsmessung* des Antriebmotors zu nennen. Die Überwachung des Verschleißzustandes des Werkzeugs durch Leistungsmessung des Hauptantriebes einer Werkzeugmaschine und Bestimmung des aufgebrachtten Drehmoments wird wegen seiner verhältnismäßig einfachen Anwendbarkeit häufig eingesetzt, um das Motordrehmoment und die Belastung auf das Werkzeug ermitteln zu können. Der Vorteil dieser Methode liegt in der technisch einfa-

chen Nachrüstbarkeit und der Unempfindlichkeit gegenüber den Umgebungsbedingungen. Der Nachteil ist die vergleichsweise große Entfernung des Messorts zum eigentlichen Ort der Belastung auf das Werkzeug. Bild 4.5 zeigt den Schnitt einer Motorspindel, bei der die Spindel direkt vom Motor angetrieben wird und nahezu kein Wirkungsgradverlust durch ein zwischengeschaltetes Getriebe entsteht.

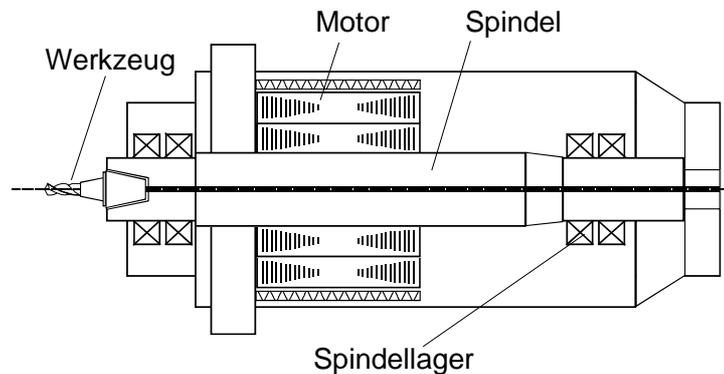


Bild 4.5 Motorspindel mit Direktantrieb (Skizze des Autors)

Bild 3.16 zeigt, dass die Schnittkraft F_c bei fortschreitendem Werkzeugverschleiß ansteigt. Die Differenz der Schnittkraft eines verschlissenen Werkzeugs zur Schnittkraft bei Einsatzbeginn kann bei dieser geradlinigen Übertragung durch die Differenz des vom Motor aufzubringenden Drehmoments erfasst und ausgewertet werden. Aus diesem Grund ist es nahe liegend, die Leistungsaufnahme des Motors zu messen und die geleistete Arbeit bzw. die erhöhte Schnittkraft zu berechnen, um den Verschleißgrad des Bohrers während der Bearbeitung zu ermitteln.

Somit beruht die Überwachung der Zerspanung auf der Auswertung der Leistungsaufnahme des Antriebmotors und des Energieverbrauchs und erfolgt nach dem Vergleichsprinzip, wodurch eine Aussage über den Zustand des Werkzeugs getroffen werden kann. Der Messumformer ermittelt die Frequenz des Antriebmotors f_{Motor} und die Wirkleistung

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3} , \quad (4.1)$$

mit denen das Drehmoment M_m

$$M_m = \frac{U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3}}{f_{\text{Motor}}} \quad (4.2)$$

bestimmt werden kann /Art04/. Die Messung der momentanen Leistungsaufnahme des Spindelmotors, die durch Integration in die erzeugte Arbeit umgerechnet werden kann, ermöglicht die Überwachung auf Werkzeugbruch. Im Allgemeinen wird mit einem neuen

Werkzeug eine *Lernkurve* erzeugt. Die maximal erreichte Leistungshöhe und die erreichte Fläche unter der Kurve werden jeweils normiert.

Das ermittelte Motordrehmoment M_m wird dem an den Werkzeugschneiden wirkenden Drehmoment M_c gleichgesetzt, für das die Schnittkraft F_c maßgebend ist, während die Vorschubkraft F_f den Vorschub bewirken muss. Dabei sind die aufzubringenden Zerspanungskräfte sowohl vom Werkstoff als auch vom Bohrverfahren selbst abhängig. Den größten Teil der Zerspanungsarbeit leisten die beiden Hauptschneiden, wobei die Schneidenecken am meisten beansprucht werden. Hier ist die Schnittgeschwindigkeit am größten, es besteht die höchste Temperatur, und die Werkstoffmenge ist gering. Bild 4.6 zeigt den Verlauf des Motordrehmoments einer Bohrung.

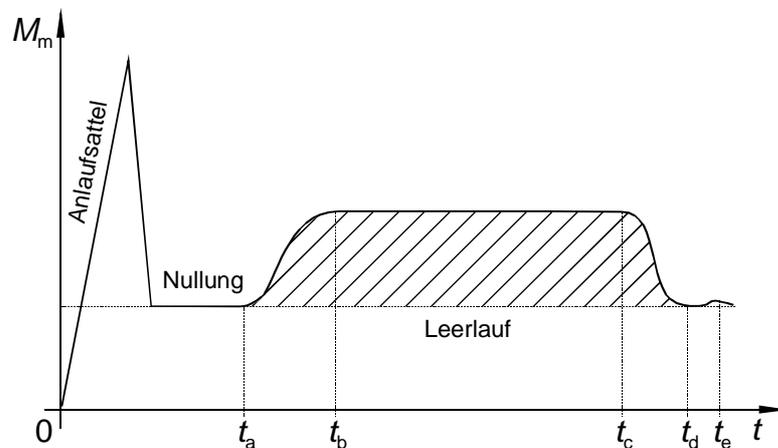


Bild 4.6 Leistungsaufnahme einer Bohrung zur Werkzeugüberwachung in Anlehnung an /Art04/

Der schraffierte Bereich stellt den Verlauf des Drehmoments während der Zerspanung dar, wobei die Motor-Leerlaufleistung P_0 unterhalb des schraffierten Bereichs liegt. Zur Zeit t_a beginnt der Bohrvorgang mit dem Auftreffen der Bohrspitze auf das Werkstück. Infolge der axialen Wirkung der Querschneide steigt die Vorschubkraft an. Das Drehmoment nimmt beim Eindringen der Bohrspitze stetig und schnell bis zum vollen Schnitt des Bohrers zu. Der volle Schnitt ist zur Zeit t_b erreicht und das volle Drehmoment wirkt. Bei t_c tritt die Bohrspitze durch das Werkstück hindurch, wodurch ein schneller Abfall der Vorschubkraft infolge des Wegfalls des Anteiles der Querschneide, bis zum völligen Durchbohren des Werkstücks, hervorgerufen wird. Ab t_d ist der Bohrvorgang beendet und lediglich die Reibung an der Bohrungswand beim rückwärtigen Herausfahren macht sich zur Zeit t_e beim Drehmoment bemerkbar.

5 Verfügbarkeitsanalyse von Transferlinien

5.1 Verwendete Begriffe der Zuverlässigkeitstechnik

Die Betriebsdauer von Maschinen wird häufig in Stunden bzw. Jahren angegeben, obwohl eine Angabe in Taktzyklen eine exaktere Beschreibung der Zuverlässigkeit darstellt, da bei langen Instandhaltungs- und Ausfallzeiten die Maschine einer wesentlich geringeren Beanspruchung ausgesetzt ist als im Betrieb. Somit ist es in einigen Fällen sinnvoll, für die Betriebszeit andere Maßeinheiten zu Grunde zu legen. Die Betriebsdauer von elektrischen Bauteilen und von Fahrzeugen wird treffender durch die Anzahl von Schaltzyklen bzw. durch die Fahrleistung in Kilometern als durch die Zeitdauer beschrieben.

Die *Betriebsdauer* zwischen zwei Ausfällen ist in der IEC 60050-191-10-04 /IEC 60050/ definiert als die „akkumulierte Dauer der Betriebszeiten zwischen zwei aufeinander folgenden Ausfällen einer instand zusetzenden Einheit“. Auf Basis dieser Definition kann die *Betriebsdauer* der *Standzeit* gleichgesetzt werden, die die Summe der benötigten Dauern aller Bohrungen bis zum festgelegten Verschleiß VB_{\max} bildet, wobei die Verfahrswege von einer Bohrungsposition bis zur nächsten explizit ausgenommen und nur die für die Bohrungen tatsächlich benötigten Dauern berücksichtigt werden.

Als *Ausfall* ist in der IEC 60050-191-04-01 /IEC 60050/ die Beendigung der Fähigkeit einer Einheit festgelegt, eine geforderte Funktion zu erfüllen, wonach sich die Einheit in einem Fehlzustand befindet.

Die Dauer bis zum Ausfall (Time to Failure, *TTF*) ist in der IEC 60050-191-10-02 /IEC 60050/ definiert als die „akkumulierte Dauer der Betriebszeiten einer Einheit ab Anwendungsbeginn bis zum Ausfall oder ab dem Zeitpunkt der Wiederherstellung bis zum nächsten Ausfall“.

Des Weiteren ist zu unterscheiden zwischen einem *Fehlzustand* und einem *vollständigen Fehlzustand*. In der IEC 60050-191-05-01 /IEC 60050/ ist ein Fehlzustand als „Zustand einer Einheit, in dem sie unfähig ist, eine geforderte Funktion zu erfüllen, ...“ beschrieben. Ein Werkzeug befindet sich in einem Fehlzustand, wenn es VB_{\max} erreicht hat und die erforderliche Qualität bezüglich Oberflächenbeschaffenheit oder Positionsgenauigkeit der Bearbeitung nicht mehr erreicht. Wohingegen ein *vollständiger Fehlzustand* in der IEC 60050-191-05-14 /IEC 60050/ als „*Fehlzustand*, der alle Funktionen

einer *Einheit* betrifft“, definiert ist und in diesem Ansatz einem Werkzeugbruch gleichgestellt wird.

Die Betriebsdauer von Werkzeugen kann als Standzeit T (gegeben in Minuten), als Standweg (gegeben in Metern) oder als Standmenge der produzierten Werkstücke beschrieben werden. Im Allgemeinen kann die Betriebsdauer als zufällig angenommen werden und stellt somit eine reelle Zufallsvariable dar.

5.1.1 Statistik in der Zuverlässigkeitstechnik

Im Werkzeugmaschinenbau wird Statistik und somit auch die Verteilungen von Kenngrößen bedeutender. Bei der Maschinenfähigkeitsuntersuchung (MFU), die während der Übergabe einer Maschine an einen Betreiber durchzuführen ist, werden die Bearbeitungen statistisch analysiert, sodass auf Grund dieser Analyse zum betreffenden Zeitpunkt davon ausgegangen werden kann, dass die Maschine eine geforderte Genauigkeit kontinuierlich erreicht. Einen großen Einfluss hierauf hat die gesamte Konstruktion der Maschine, ausgehend von der Auswahl der Baukomponenten und deren Werkstoffe, die bei den einzelnen Baugruppen eingesetzt werden. Die Fertigungsgenauigkeit der einzelnen Komponenten und deren anschließende Montage zu Baugruppen beeinflusst ebenfalls die Zuverlässigkeit der Maschine. Nicht zuletzt hat die Auswahl der richtigen Werkzeuge – entscheidend ist hier die Qualität der Werkstoffe, aus denen sie gefertigt wurden – einen hohen Einfluss auf die Effektivität der Produktion. Nach der Bearbeitung werden zur Überprüfung der Maschinenfähigkeit bei der Qualitätsmessung Verteilungen berücksichtigt, die zum einen auch bei der Verschleißanalyse der Werkzeuge und bei der Betriebsdauer- oder Standzeitbetrachtung wichtig sind.

Die Auswertung der Daten (siehe Abschnitt 6.2) ergab, dass die Standzeiten der Bohrer logarithmisch normalverteilt sind. Daher wird im Folgenden die logarithmische Normalverteilung kurz vorgestellt.

Eine stetige Zufallsvariable X heißt logarithmisch normalverteilt, wenn ihr natürlicher Logarithmus $\rho^* = \ln x$ normalverteilt ist. Die Dichtefunktion der logarithmischen Normalverteilung ist links durch Null begrenzt und läuft rechts flach aus; sie wird durch

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}, \quad x \geq 0, \sigma > 0 \quad (5.1)$$

beschrieben. Für die logarithmische Normalverteilung gilt

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} dx, \quad x \geq 0, \sigma > 0. \quad (5.2)$$

Bild 5.1 zeigt die Dichte der logarithmischen Normalverteilung für verschiedene Werte von μ und σ , wobei der natürliche Logarithmus verwendet wurde.

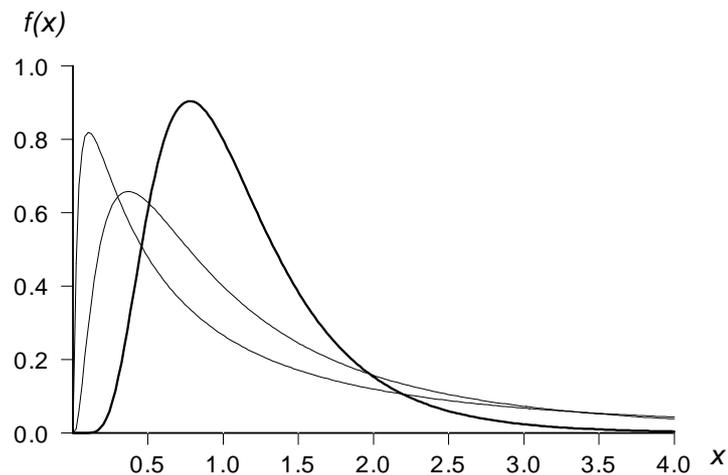


Bild 5.1 Graphen der Dichten der logarithmischen Normalverteilung

5.1.2 Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik bei der Verschleißanalyse von Werkzeugen

Als bedeutendster Pionier der systematischen Analyse des Verschleißes von Werkzeugen, insbesondere Drehmeißeln, ist *Fred. W. Taylor* [Tay07] zu nennen. Taylor hat rund 26 Jahre, von 1880 bis 1906, Schnittversuche durchgeführt, um zu ermitteln, bei welcher Bearbeitung welches Werkzeug mit welcher Schnittgeschwindigkeit und welchem Vorschub am günstigsten ist. Bis dahin waren die benutzten Schnittparameter von der Erfahrung eines jeden Arbeiters abhängig. Durch den Ansatz von Taylor war es möglich, einen guten Vorarbeiter in den Stand zu setzen, die Leistung einer Drehbank zu verdoppeln, die ein erstklassiger Arbeiter mit sehr guter Kenntnis 10 Jahre lang geführt hatte. Taylor hat durch die Analyse von bis zu 50.000 Versuchen die nach ihm benannte Taylor-Gleichung und deren Gerade für unterschiedliche Kombinationen von Werkstückstoff und Werkzeug mit verschiedenen Schnittparametern entwickelt. Taylor hat festgestellt, dass die Standzeit in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit logarithmisch normalverteilt ist. Unter der Bedingung des konstanten Vorschubs lässt sich in einem doppelt-logarithmischen Wahrscheinlichkeitspapier die Standzeit eines Werkzeugs als Funktion der Schnittgeschwindigkeit darstellen, siehe Bild 3.8.

5.2 Funktionaler Aufbau von Transferlinien

Bild 5.2 skizziert eine Transferlinie, bestehend aus vier Arbeitsstationen 1A, 2B, 3A und 4B, wobei die Anordnung der Arbeitsstationen von der sinnvollen Reihenfolge der unterschiedlichen Bearbeitungen des Werkstücks wie z. B. Vor- und Feinbearbeitung, den Kombinationen der verschiedenen Bearbeitungen in einer Station und den einzelnen Bearbeitungszeiten abhängt.

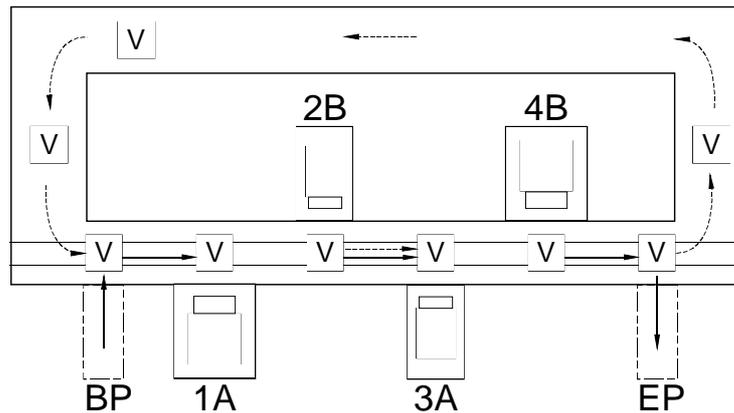


Bild 5.2 Schematische Darstellung einer Transferlinie

Das Beladeportal (BP) und das Entladeportal (EP), siehe Bild 5.2, erfüllen die Aufgabe des automatischen Materialflusses. Diese Komponenten können prinzipiell durch manuelle Be- oder Entladung ersetzt werden und haben keinen Einfluss bezüglich der weiteren Betrachtungen.

Die Arbeitsstationen werden entsprechend ihrer Anordnung in der Transferlinie fortlaufend nummeriert, wobei die in Transferrichtung rechts angeordneten mit „A“ und die links angeordneten mit „B“ gekennzeichnet sind.

In BP werden die Werkstücke in den Vorrichtungen (V) ausgerichtet und durch Spannpratzen fixiert. Nach jedem Bearbeitungstakt werden die Werkstücke zusammen mit den Vorrichtungen mit Hilfe einer Transferstange zur folgenden Arbeitsstation transportiert. Nachdem in EP die Spannpratzen der Vorrichtungen und die Werkstücke entnommen worden sind, werden die leeren Vorrichtungen über eine Rückföhrbahn zum Beladeportal befördert. Die gestrichelten Pfeile stellen den kontinuierlichen Fluss der Vorrichtungen und die durchgezogenen Pfeile den Werkstückfluss dar.

Die NC-Steuerungen der einzelnen Bearbeitungsstationen werden von einer Hauptsteuerung kontrolliert. In den NC-Steuerungen sind die Parameter der Achsbewegungen, der Translationsachsen und der zugehörigen Rotationsachsen definiert. Zusätzlich enthalten die NC-Steuerungen die Schnittparameter der Bearbeitungskenngrö-

ßen Drehzahl und Vorschub, wobei die aktuellen Positionen der Werkzeuge während der Bearbeitung mit dem Soll-Zustand verglichen werden. Der Bearbeitungsvorgang ist beendet, wenn der Soll-Zustand erreicht wird und eine Fertigmeldung an die Steuerung erfolgt ist. Danach wird die Bearbeitungseinheit in ihre Grundstellung zurückgefahren und wartet auf die Freigabe für den nächsten Bearbeitungsvorgang. Diese Freigabe erteilt die Hauptsteuerung, wenn die nächste Vorrichtung die Bearbeitungsposition erreicht hat und fixiert ist. Diese Zustandsmeldung wird der NC-Steuerung über die Position von Endschaltern mitgeteilt.

5.2.1 Betriebsdatenerfassung an Transferlinien

Zur Durchführung einer Verfügbarkeitsanalyse werden die Ausfalldauern, welche die Stillstandszeiten vom Ausfall bis zum Neustart und die entsprechenden Ausfallabstände, die die Betriebsdauern zwischen Neustart und Ausfall bezeichnen, ermittelt. Damit diese Daten gültig sind, muss die Anlage über einen ausreichend langen Zeitraum beobachtet werden. Zur Ermittlung dieser erforderlichen Datenbasis können verschiedene Methoden angewendet werden:

- Maschinenschreibererfassung
- automatische Datenerfassung
- manuelle Datenerfassung.

Ein Maschinenschreiber zeichnet das Laufverhalten der Maschine mechanisch mit einem Stift über einen festgelegten Zeitraum auf. Ein wesentlicher Nachteil dieser Methode ist die fehlende Angabe der Ausfallursache.

Mit Hilfe der automatischen Datenerfassung ist es möglich, zusätzliche Diagnosefunktionen in der Hauptsteuerung der Anlage durchzuführen, wodurch Stillstände erkannt und beurteilt werden können. Vorteile dieser Methode sind eine exakte Zeiterfassung im Sekundenbereich und eine kontinuierliche Aufzeichnung der Daten über einen längeren Zeitraum. Neben der ungewissen Zuweisung der tatsächlichen Ursache der Stillstände ist eine Ermittlung von organisatorischen Ursachen nicht möglich.

Bei der manuellen Datenerfassung werden die auftretenden Stillstände von unabhängigem Analysepersonal notiert und den Stillständen können auf Grund der Kenntnis über die Arbeitsabläufe Ursachen zugeordnet werden. Nach Abschluss der Datenerfassung werden die Daten statistisch ausgewertet und beurteilt. Ein bedeutender Nachteil dieser Methode ist der sehr hohe Personalbedarf und die dadurch entstehenden Kosten.

Tabelle 5.1 stellt die Methoden der Datenerfassung mit ihren Eigenschaften einander gegenüber.

Tabelle 5.1 Vor- und Nachteile der Datenerfassungsmethoden

Methode	Zeitraum	Genauigkeit	Ursachenangabe
manuelle Datenerfassung	begrenzt	gut	sehr gut
Maschinenschreiberfassung	kontinuierlich	mittel	keine
automatische Datenerfassung	kontinuierlich	sehr gut	gut

5.3 Zuverlässigkeitstechnische Betrachtung einer Transferlinie

Eine Transferlinie stellt aus Sicht der Zuverlässigkeit ein Seriensystem dar, wobei die Transferlinie keinen Puffer zwischen den Arbeitsstationen besitzt, sodass, sobald eine Station ausfällt, die ganze Transferlinie ausgefallen ist. Bild 5.3 zeigt die vier Arbeitsstationen der in Bild 5.2 dargestellten Transferlinie in einer logischen Serienanordnung mit den Modulen bzw. Arbeitsstationen S_1 bis S_4 .



Bild 5.3 Zuverlässigkeitsblockdiagramm der Transferlinie

Wird das Überleben eines Moduls i als zufälliges Ereignis und die Ereignisse der verschiedenen Komponenten als unabhängig voneinander angesehen, kann die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ für das gleichzeitige Eintreten der n unabhängigen Ereignisse durch

$$R(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) \quad (5.3)$$

mit p_i als Überlebenswahrscheinlichkeit des i -ten Moduls berechnet werden. Entsprechend gilt für die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$

$$F(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i(t)) \quad (5.4)$$

mit q_i als Ausfallwahrscheinlichkeit des i -ten Moduls. Es wird davon ausgegangen, dass die Transferlinie nur während der aktiven Produktion ausfallen kann und mögliche unabhängige Ausfälle während eines Stillstands unberücksichtigt bleiben. Hierdurch wird die Stillstandsanalyse auf die häufigsten und wichtigsten Ausfallarten einer Transferlinie konzentriert.

Bei Betrachtung eines ausreichend lange Zeitintervalls der Dauer t_{int} , in dem die Arbeitsstation i mit der Häufigkeit s_i mit $i = 1, \dots, k$ ausfällt, wird die Transferlinie, wenn keine Arbeitsstation ausfällt, ω Teile produzieren.

Wird davon ausgegangen, dass i eine mittlere Instandsetzungszeit ($MTTR_i$) von $1/\mu_i$ Zeiteinheiten bei jedem Ausfall besitzt, kann die gesamte Stillstandszeit DT (Downtime) der Transferlinie annähernd durch

$$DT = \sum_{i=1}^k \frac{s_i}{\mu_i} \quad (5.5)$$

und die gesamte Betriebszeit UT (Uptime) annähernd durch

$$UT = t_{\text{int}} - \sum_{i=1}^k \frac{s_i}{\mu_i} \quad (5.6)$$

beschrieben werden. Die Effektivität der Transferlinie E_{ODF} kann damit durch den Koeffizienten

$$E_{\text{ODF}} = \frac{U}{t_{\text{int}}} \quad (5.7)$$

ermittelt werden.

5.3.1 Einfluss des Werkzeugwechsels auf die Verfügbarkeit

Die sicherheitstechnischen Anforderungen an Fertigungsanlagen werden hauptsächlich auf Produktionsbedingungen bezogen, weshalb Transferlinien und Bearbeitungszentren meistens vollständig verkleidet sind. Zur Instandhaltung, das heißt zur Wartung oder zur Reparatur, ist es oft erforderlich, diese schützende Verkleidung zu öffnen, wodurch der Schutz teilweise oder ganz aufgehoben wird. Somit müssen bei der sicherheitstechnischen Betrachtung einer Fertigungsanlage zusätzlich zu den Gefährdungen während der Produktion auch die Gefährdungen während der Instandhaltung berücksichtigt werden.

Auch wenn die Instandhaltung im Vergleich zur Produktion einen geringeren Anteil der Betriebsdauer in Anspruch nimmt, ist es notwendig, während der Planung und Konstruktion von Transferlinien die erforderlichen Voraussetzungen für eine gefahrenfreie Instandhaltung zu schaffen. Neben den konstruktiven Sicherheitsmaßnahmen sind die Zuverlässigkeitskennwerte auf Basis angewandter Wahrscheinlichkeitsrechnung und sich daraus ergebende Zusatzmaßnahmen wie zum Beispiel Instandhaltungsplanung, Zustandsüberwachung und Redundanz dazu geeignet, einen geforderten Sicherheitsstandard herzustellen. Die sicherheitstechnische Prognose wird durch Angabe von

Schätzwerten für die Verfügbarkeit, die Überlebens- und die Ausfallwahrscheinlichkeit für Wartungsabstände unterstützt /StVo92/.

Neben der Gewährleistung der Sicherheit während der Produktion zielt eine sicherheitsgerechte Konstruktion darauf ab,

- Instandhaltungstätigkeiten vollständig zu vermeiden,
- Instandhaltungstätigkeiten zu reduzieren beziehungsweise
- Instandhaltungstätigkeiten insbesondere unter Arbeitssicherheitsaspekten zu vereinfachen /Bec86/.

Wird der Werkzeugwechsel als Instandhaltungsmaßnahme betrachtet, kann eine der drei grundlegenden Instandhaltungsstrategien nach Beichelt und Franken /BeFr84/ angewendet werden:

- **Ausfallabhängige Instandhaltung**
Die Werkzeuge werden solange eingesetzt, bis die erreichte Bearbeitungsgenauigkeit nicht mehr der gewünschten Qualität entspricht.
- **Periodisch vorbeugende Instandhaltung**
Die Werkzeugwechsel werden periodisch nach einem vorher festgelegten Werkzeugwechselplan durchgeführt.
- **Zustandsabhängige vorbeugende Instandhaltung**
Der Werkzeugwechsel wird abhängig vom Verschleißzustand des Werkzeuges entsprechend eines vorher festgelegten Grenzwertes durchgeführt.

Die ausfallabhängige Strategie ist bei Fertigungsanlagen anzutreffen, in denen – zur wirtschaftlichen Verbesserung – Personalkosten reduziert worden sind. Bei derartigen Rationalisierungsmaßnahmen wird nicht *direkt* produktives Instandhaltungspersonal auf ein Minimum reduziert, was kurzfristig zu geringeren Kosten, jedoch langfristig zu einer Erhöhung der Unverfügbarkeit des Systems führt.

Um die Stillstandszeiten an Transferlinien zu reduzieren und die Zuverlässigkeit zu erhöhen, sind präventive Instandhaltungsmaßnahmen erforderlich. Dabei werden neben dem üblichen Auffüllen von Öl- und Schmierbehältern Systemzustandsanzeigen, wie zum Beispiel Druck, Temperatur, Schaltzyklen überprüft. Des Weiteren werden Verschleißteile kontrolliert und erforderlichenfalls ausgetauscht, wozu auch der Werkzeugwechsel zählt. Präventive Instandhaltung ist in /BeKa00, Bir97, Mey94, BeFr84/ erläutert und kann auch auf den Werkzeugwechsel angewendet werden.

Die Stillstandszeiten von Transferlinien auf Grund von Werkzeugwechsel sind neben den technischen Ausfällen von besonderer Bedeutung, siehe Kapitel 1. Der in einer

Werkzeugwechselstrategie festgelegte Wechselzeitpunkt entsprechend einer bestimmten, zuvor empirisch ermittelten Werkstückzahl kann durch erforderliche nicht-planmäßige Werkzeugwechsel gestört werden. Die Standzeit eines Werkzeuges bzw. dessen Werkzeugwechselzeitpunkt ist eine Zufallsgröße, die in guter Näherung einer logarithmischen Normalverteilung folgt /Tön95/.

Der Erhöhung der Produktivität dienen neben der Reduzierung der Stillstandszeiten durch Vermeidung von technischen Ausfällen die Senkung der Werkzeugwechselzeit und insbesondere die Erzielung der kleinstmöglichen Anzahl von Werkzeugwechseln. Die Werkzeugwechselzeit umfasst den Zeitraum vom Ausspannen eines unbrauchbaren Werkzeuges, dem Einspannen eines neuen Werkzeuges bis zu den Mess-, Kontroll- und Einstellarbeiten. Diese Zeit ist je nach Werkzeug und Bearbeitung unterschiedlich groß und kann mehr oder weniger beeinflusst werden.

Ebner /Ebn95/ hat die Verfügbarkeit verschiedener Fertigungssysteme analysiert und festgestellt, dass ungefähr die Hälfte des Rüstanteils auf den Wechsel von verschlissenen Werkzeugen entfiel. Der Reduzierung der Zeit für einen Werkzeugwechsel wurde durch Entwicklungen von Werkzeugkonstruktionen zum Schnellwechsel, zum automatischen Werkzeugwechsel und zur Voreinstellung der Werkzeuge außerhalb der Transferlinie während der Betriebszeit Rechnung getragen. Auf diesen Gebieten können Verbesserungen nur noch durch hohen Aufwand erreicht werden /Sau73/.

Dem Ziel der kleinstmöglichen Anzahl von Werkzeugwechseln wird durch die Entwicklung von verbesserten Schneidmitteln wie Hartmetallwerkzeugen, Wendeschneidplatten und Keramikwerkzeugen versucht näher zu kommen.

Auf dem Gebiet der Werkzeugwechselstrategie, die zum Ziel hat, so viele Werkzeugwechsel wie möglich zum gleichen Zeitpunkt durchzuführen, besteht noch ein großes Entwicklungsdefizit. Hierzu ist das optimale Verhältnis von Belastung, Verschleiß, Dauer des Werkstück-Zyklus (Taktzeit) und Anzahl der erforderlichen Werkzeugwechsel festzulegen. Jedoch wird die festgelegte Strategie durch Ereignisse wie zum Beispiel Lunker oder Härtegradunterschiede im Werkstück oder Qualitätsunterschiede im Werkzeug beeinflusst. Wird erkannt, dass die von der Werkzeugwechselstrategie vorgegebene Stückzahl nicht erreicht wird, kann es sinnvoll sein, die auf das Werkzeug wirkende Belastung zu reduzieren, um die Vorgabe der Strategie zu erreichen. Werden dadurch zusätzliche Werkzeugwechselzyklen während einer Schicht vermieden und die Harmonisierung der Strategie gewahrt, kann eine Taktzeiterhöhung in Kauf genommen werden.

In Bild 5.4 ist dargestellt, dass eine niedrigere Taktzeit nicht unbedingt einen höheren Output mit sich bringt. Ohne Berücksichtigung des Verschleißes und daraus resultierenden häufigeren Werkzeugwechsel kann bei geringerer Taktzeit der Output einer Transferlinie niedriger sein.

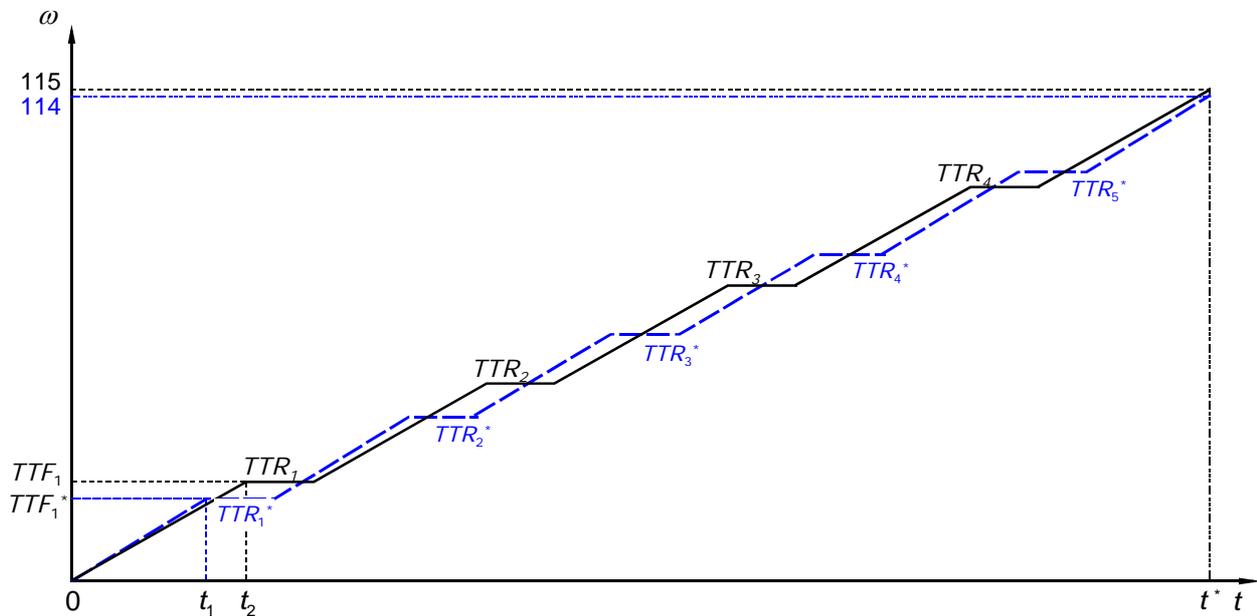


Bild 5.4 Ausbringung über die Zeit bei verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten unter Berücksichtigung der erforderlichen Werkzeugwechsel. TTF_j ist die Zeit bis zum Ausfall des j -ten Werkzeugs, TTR_j dessen Instandhaltungszeit; Größen mit Stern beziehen sich auf ein geregeltes System, ohne Stern auf ein ungeregeltes.

Durch Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit $v_c = 100$ m/min auf $v_c^* = 110$ m/min, wird die Schnittzeit von $t_c = 48$ s auf $t_c^* = 44$ s reduziert, was jedoch die Standzeit $T = 18$ min auf $T^* = 14$ min (gestrichelt dargestellt) wegen der erhöhten Belastung auf das Werkzeug senkt; die produzierbare Stückzahl eines Werkzeugs wird somit von 23 auf 19 reduziert. Nach einem Beobachtungszeitraum von $t^* = 143$ min werden mit einer Schnittzeit t_c von 48 Sekunden 115 Werkstücke gefertigt, wohingegen mit einer Schnittzeit t_c^* von 44 Sekunden 114 Werkstücken produziert werden, da ein zusätzlicher Werkzeugwechsel erforderlich ist.

Eine höhere Schnittgeschwindigkeit führt zu einer geringeren Schnittzeit pro Werkstück, aber eine höhere Ausbringung kann nur bei sehr kurzen Werkzeugwechselzeiten erzielt werden. Die in der Praxis gemessenen Werkzeugwechselzeiten deuten jedoch darauf hin, dass zusätzliche Werkzeugwechsel den Zeitgewinn durch die Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit verbrauchen und sogar das Gesamtergebnis verschlechtern.

Bei Verfügbarkeitsanalysen wurden die *Werkzeugwechselzeiten* an Arbeitsstationen von Transferlinien bei zwei verschiedenen Automobilherstellern erfasst. Tabelle 5.2 zeigt die statistischen Ergebnisse der diskreten Zeiten der planmäßigen und unplanmäßigen Werkzeugwechsel dieser Analysen. Dabei ist N_{WZW} die Anzahl der Werkzeugwechsel, \bar{X} der Mittelwert empirisch ermittelter Werkzeugwechseldauern, s die zugehörige Standardabweichung, Δt die Klassenbreite, μ_T der Mittelwert der angepassten stetigen Werkzeugwechseldauern und σ_{TW} die zugehörige Standardabweichung. Die Abweichung der stetigen zur empirischen Verteilung entsprechend des Kolmogorow-Smirnow-Tests /Bir97/ ist mit δ_n bezeichnet.

Tabelle 5.2 Werkzeugwechselzeiten an Arbeitsstationen von Transferlinien verschiedener Betreiber
(Anzahl der Werkzeugwechsel: N_{WZW} , alle weiteren Größen sind im Text definiert)

	planmäßige WZW Betreiber 1	unplanmäßige WZW Betreiber 1	planmäßige WZW Betreiber 2	unplanmäßige WZW Betreiber 2
N_{WZW}	84	48	51	43
\bar{X}	7,42 min	7,14 min	7,06 min	10,30 min
s	3,51 min	5,32 min	5,23 min	9,64 min
Δt	2,2 min	2,8 min	2,8 min	5,6 min
μ_T	7,58 min	7,05 min	6,96 min	9,96 min
σ_{TW}	4,04 min	5,07 min	4,97 min	7,83 min
δ_n	0,07988	0,03455	0,03792	0,09475

Ein Anpassungstest der Daten der planmäßigen Werkzeugwechsel des Betreibers 1 ergab, dass die logarithmische Normalverteilung LN(7,58; 4,04) eine akzeptable Anpassung ergab. Die Analyse der diskreten Daten der Transferlinie des Betreibers 1 ergab für planmäßige Werkzeugwechsel einen Mittelwert $\bar{X} = 7,42$ min mit einer Standardabweichung $s = 3,51$ min und für unplanmäßige Werkzeugwechsel einen Mittelwert $\bar{X} = 7,14$ min mit einer Standardabweichung $s = 5,32$ min. Die Dichten der diskreten Daten, in Bild 5.5 und in Bild 5.6 als Häufigkeitsdiagramm dargestellt, sind durch die Verteilungsdichte

$$f(\Delta t) = \frac{\Delta N_{a,i}}{\Delta t \cdot N_0} \quad (5.8)$$

ermittelt worden, wobei die Anzahl der Werkzeugwechsel in Klassen $\Delta N_{a,i}$ durch die Breite Δt und die Gesamtanzahl N_0 der entsprechenden Werkzeugwechsel dividiert wurde. Die planmäßigen Werkzeugwechsel sind als weiße Histogramme; die entsprechende stetige Verteilung mit durchgezogener Linie und die unplanmäßigen Werkzeugwechsel sind als Histogramme schraffiert mit entsprechender stetiger Verteilung strichpunktiert dargestellt.

Bild 5.5 zeigt die angepassten stetigen logarithmischen Normalverteilungen an die Histogramme der diskreten Daten für den planmäßigen wie auch unplanmäßigen Werkzeugwechsel des Betreibers 1.

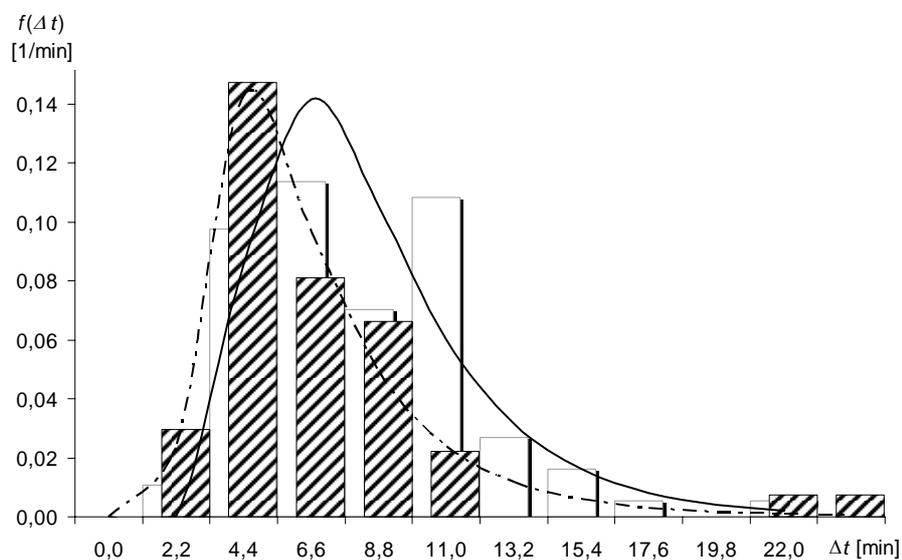


Bild 5.5 Stetige und diskrete logarithmische Normalverteilung der geplanten und ungeplanten Werkzeugwechsel des Betreibers 1 (unplanmäßige Werkzeugwechsel sind schraffiert bzw. strichpunktiert)

Die stetige Dichte der angepassten logarithmischen Verteilung besitzt für planmäßige Werkzeugwechsel einen Mittelwert $\mu_T = 7,58$ min mit einer Standardabweichung von $\sigma_{TW} = 4,04$ min sowie für unplanmäßigen Werkzeugwechsel einen Mittelwert $\mu_T = 7,05$ min mit einer Standardabweichung von $\sigma_{TW} = 5,07$ min. Die Ergebnisse des Betreibers 2 ergaben für planmäßigen Werkzeugwechsel einen Mittelwert $\mu_T = 7,42$ min mit einer Standardabweichung $\sigma_{TW} = 3,51$ min und für unplanmäßigen Werkzeugwechsel einen Mittelwert $\mu_T = 7,14$ min mit einer Standardabweichung $\sigma_{TW} = 5,32$ min. In Bild 5.6 sind für den planmäßigen wie auch für den unplanmäßigen Werkzeugwechsel die stetigen logarithmischen Normalverteilungen an die Histogramme der diskreten Daten des Betreibers 2 angepasst.

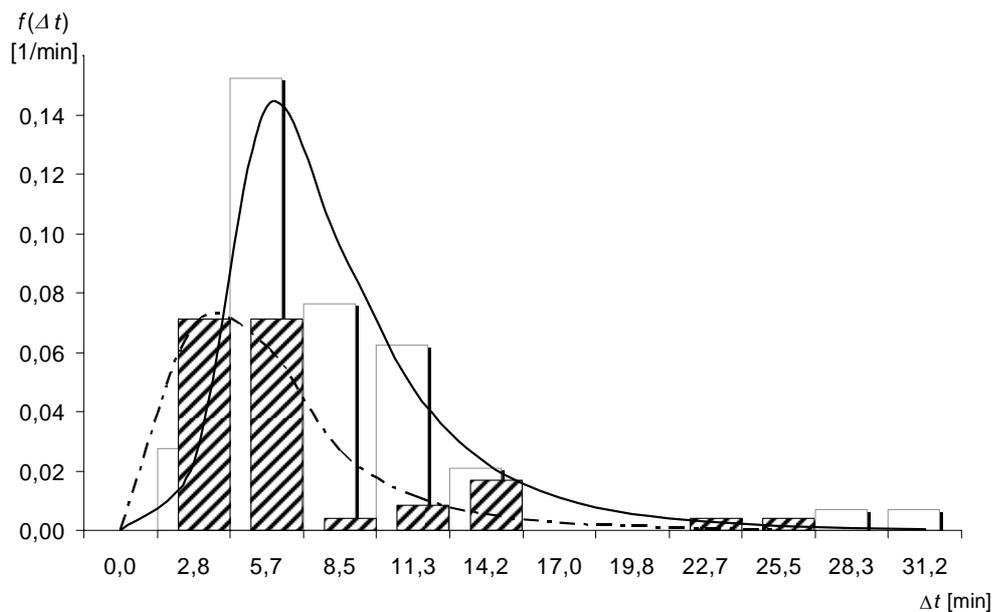


Bild 5.6 Stetige und diskrete logarithmische Normalverteilung der geplanten und ungeplanten Werkzeugwechsel des Betreibers 2 (unplanmäßige Werkzeugwechsel sind schraffiert bzw. strichpunktiert)

Die Anpassung der stetigen an die diskrete Dichte wurde durch einen Kolmogorow-Smirnow-Test geprüft, wobei die Prüfgröße δ_n , siehe Tabelle 5.2, gegenüber der kritischen Größe δ_{kritisch} sehr klein ausfällt.

6 Zuverlässigkeitsabschätzung auf Basis der Korrelation von Schnittkraft und Verschleiß

Unregelmäßigkeiten im Werkstück wie z. B. Lunker und Härtegradunterschiede oder Ungleichmäßigkeiten in der Schneidhaltigkeit eines Werkzeugs, auch desselben Herstellers, erschweren die exakte Bestimmung optimaler Schnittbedingungen nach Richtwerten. In der industriellen Fertigung bewirken die starken Abweichungen der auftretenden Standzeiten, bei scheinbar gleichen Zerspanungsbedingungen, dass ein Werkzeugwechsel entsprechend der Standzeitvorgaben selten bei gleichzeitiger Nutzung bis zur Verschleißmarke durchgeführt wird. Dies hat zur Folge, dass insbesondere bei Transferlinien zusätzliche Stillstandzeiten entstehen.

Diese Zeiten können reduziert werden, indem die Schnittwerte während der Betriebsdauer eines Werkzeuges so verringert werden, dass die Standzeitvorgabe erreicht wird.

In diesem Kapitel werden die Einflüsse der Schnitt- und Vorschubkraft auf das Zerspanungssystem bei steigendem Verschleiß anhand der Ergebnisse von Standzeitversuchen mit Spiralbohrern, die von der Fa. Kennametal Hertel /KeHe99/ zur Verfügung gestellt wurden, erläutert.

Die Entwicklung der eingesetzten *Werkzeugwerkstoffe* und der Beschichtungen ermöglicht die Trockenbearbeitung von *Werkstückwerkstoffen* unter extremen Bedingungen. Um die Anzahl der durchzuführenden Bohrungen möglichst niedrig zu halten, sind die Schnittwertgrenzen rechnerisch ermittelt und die Versuche mit den eingesetzten Bohrern bis an deren Belastungsgrenze durchgeführt worden. Eine statistisch minimal erforderliche Stichprobenanzahl von 30 Bohrern ist als ausreichend angenommen worden, um eine Aussage über die Zusammenhänge der Krafteinwirkung, des Verschleißes und der Standzeit des Bohrers mit ausreichender Genauigkeit treffen zu können. Damit kein unvollständig genutzter Bohrer vor dem Erreichen der Standzeit ausgetauscht wird, soll ein vorgegebener Verschleiß möglichst genau erreicht werden, ohne ihn zu überschreiten. Zur Regelung der Standzeit können von den zahlreichen Einflussfaktoren allenfalls die Schnittgeschwindigkeit und der Vorschub als Regelgrößen dienen. Der Einfluss der Schnitttiefe ist zwar vorhanden, aber nicht zur Regelung geeignet. In diesem Ansatz wird die Schnittgeschwindigkeit als Regelgröße eingesetzt und der Vorschub auf einem möglichst hohen Wert konstant gehalten. Somit bleibt die Übersichtlichkeit über die Auswirkungen der Regelung erhalten, was jedoch im Weiteren auf

die Möglichkeit der Regelung sowohl durch die Schnittgeschwindigkeit als auch durch den Vorschub als Regelgröße ausgeweitet werden kann.

Um während einer vorgegebenen Standzeit eine möglichst hohe Ausbringung zu erreichen, ist deshalb zunächst die Schnitttiefe a_p , soweit sie nicht festgelegt ist, so groß wie möglich zu wählen. Dadurch können die Anzahl der Schnitte und die Nebenzeiten für Abheben, Zurückfahren und Neupositionieren minimiert werden. Um die Hauptzeit zu minimieren, ist ebenfalls der Vorschub so groß wie möglich zu wählen. Neben der geringeren Verschleißwirkung des Vorschubes gegenüber der Schnittgeschwindigkeit sinkt mit zunehmendem Vorschub die spezifische Schnittkraft, wodurch die Maschinenleistung besser ausgenutzt werden kann. Dadurch ergibt sich folgende Reihenfolge der Schnittdatenfestlegung:

1. Schnitttiefe so groß wie möglich,
2. Vorschub so groß wie möglich und
3. Schnittgeschwindigkeit so groß, dass die Standzeit gerade noch erreicht wird.

Hiermit ist das Schnittwertoptimierungsproblem auf die Bestimmung der Schnittgeschwindigkeit nach VDI 3321 entsprechend der angestrebten Standzeit begrenzt.

Die Eigenschaft, dass bei fortschreitendem Verschleiß von Bohrern die Schnittkraft steigt, wird hier zur Abschätzung der *time to failure* (*TTF*) genutzt. (Die *TTF* wird in diesem Zusammenhang als *Standzeit* bezeichnet.) Im Folgenden kann daher eine grobe Anpassung der *TTF* durch Lastminderung der Werkzeuge erreicht werden. Eine reduzierte Schnittgeschwindigkeit eines Bohrers erhöht einerseits die Bearbeitungszeit pro Werkstück, andererseits aber auch die maximale Anzahl der Bohrungen, die mit diesem Bohrer gefertigt werden können. Die Anforderungen an die Bearbeitungsqualität bestimmen den Wert der maximalen Verschleißmarkenbreite von Bohrern. Der Verschleiß steht in direktem Verhältnis zur Komponenten-Zuverlässigkeit: Wenn die maximale Verschleißmarkenbreite erreicht ist, wird dieses als Werkzeug-Ausfall im Sinn der Beendigung der Fähigkeit, eine geforderte Funktion zu erfüllen, angesehen.

Im vorliegenden Kapitel wird die Beziehung zwischen der Schnittkraft F_c , der Schnittgeschwindigkeit v_c und dem Werkzeugverschleiß $VB(t)$ in Bezug zur Zuverlässigkeit eines einzelnen Werkzeugs zur Ausfallzeit diskutiert, um letztendlich die Verfügbarkeit einer Transferlinie erhöhen zu können /Die05/. Als Beispiel dient ein Bohrer, wobei jedoch der Ansatz auch auf andere Schneidwerkzeuge und Anwendungen übertragen werden kann.

6.1 Planung und Spezifikation der Versuche

Versuchsreihen mit beschichteten Hartmetall-Wendelbohrern und Werkstücken aus Rundstahl des Materials 42CrMo4V sind durchgeführt worden, um eine Taylor-Gerade entsprechend Gleichung (3.6) zu modellieren und zur Schnittwertoptimierung wurde gleichzeitig die Schnittkraft-Kennlinie analysiert.

In den Versuchsreihen wurden insgesamt 36 doppelschneidige Hartmetall-Wendelbohrer durch insgesamt mehr als 53.800 Bohrungen untersucht. In diesen Versuchsreihen ist der Verschleiß durch Messung und Aufzeichnung der Schnittkraft während jeder zehnten Bohrung beobachtet worden, da dieses zurzeit einfacher zu realisieren ist, als eine optische in-process-Messung der $VB(t)$. Der Ansatz ist auch bei optischer Messung der Verschleißmarkenbreite mit Digitalkamera, wie von /OtKu02/ vorgestellt und bei zukünftiger optischer in-process-Messung, anwendbar. Nach jeder bearbeiteten Werkstückseite ist die Verschleißmarkenbreite beider Schneidecken mit einem Mikroskop mit 40facher Vergrößerung gemessen und fotografiert worden. Die Fotos 1 bis 6 in Bild 6.1 zeigen chronologisch den Freiflächenverschleiß auf der Hauptfreifläche und VB_{max} an der Schneidecke des Bohrers 34.

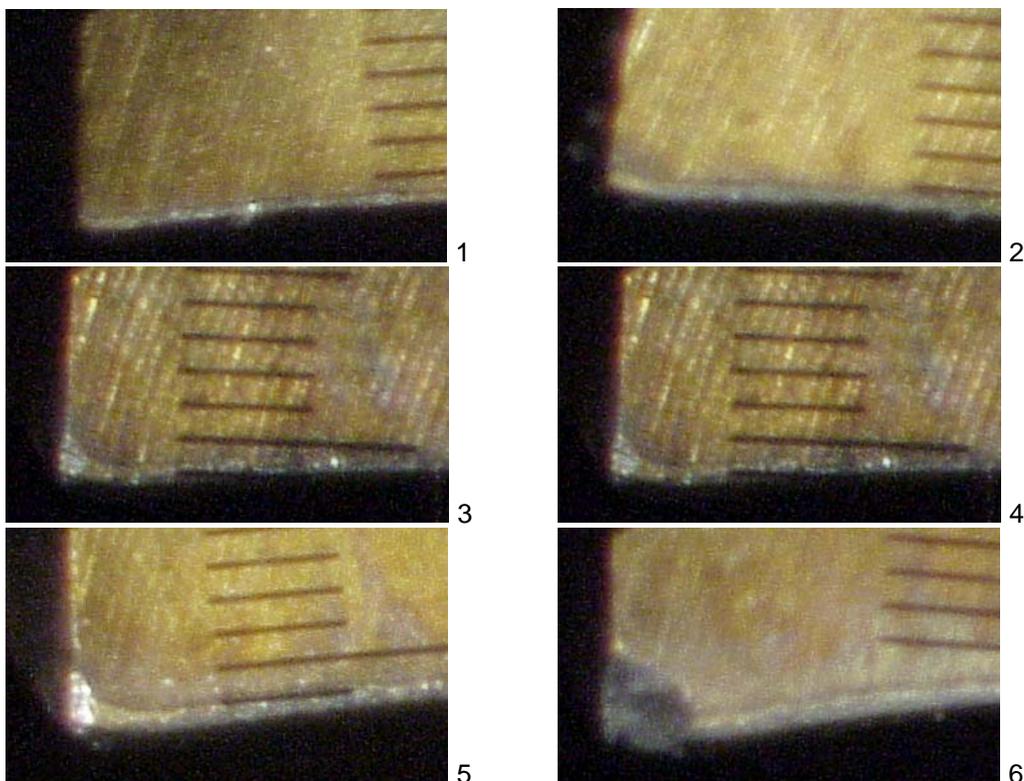


Bild 6.1 Gemessener Freiflächenverschleiß des Bohrers 34

Bild 6.2 zeigt die gemessene Verschleißentwicklung des Bohrers 34, mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 75$ m/min, in Schritten von 4,4 m bzw. 176 Bohrungen über

einen gesamten Standweg von 26,4 m: Dabei ist festzustellen, dass sich beide Schneiden unterschiedlich schnell abnutzen. Die erste Phase endet bei 6 m Standweg, in der der Verschleiß degressiv ist, von 6 m bis ca. 22 m kann der Verschleiß als linear angesehen werden und ab 22 m beginnt ein progressives Verschleißverhalten, das bei einer höheren maximalen Verschleißmarkenbreite deutlicher heraustreten würde.

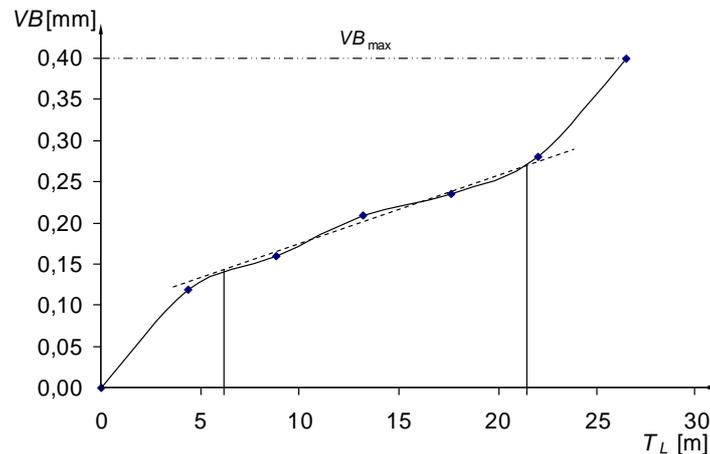


Bild 6.2 Verschleißentwicklung VB des Bohrers 34

Zur genaueren Illustration des Freiflächenverschleißes wurde abschließend eine Rasterelektronenmikroskopaufnahme durchgeführt. Bild 6.3 zeigt eine Schneidecke aus der Versuchsreihe, die mit einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 75$ m/min durchgeführt wurde. Dieser Bohrer hat die maximale Verschleißmarkenbreite VB_{\max} von $0,4$ mm $\equiv VB_{0,4}$ nach 30,8 m beziehungsweise 1232 Bohrungen erreicht.

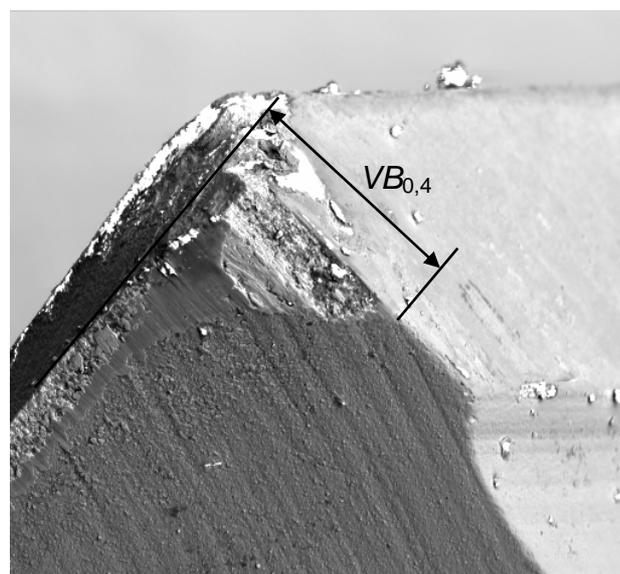


Bild 6.3 Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines Bohrers bei $VB_{0,4}$ (Aufnahme des Autors)

Die Schnittkraft-Kennlinien der Kombination des Werkstück- und Werkzeugmaterials sind entweder bekannt oder müssen individuell ermittelt werden. Die aktuelle Verschleißmarkenbreite $VB(t)$ kann auch optisch in bestimmten Intervallen gemessen werden, was jedoch sehr zeitintensiv und somit in der Produktion nicht umsetzbar ist.

Dieser neue Ansatz zur zuverlässigkeits-adaptiven Werkzeugwechselstrategie zeigt die Möglichkeit zur Messung der aktuellen Verschleißmarkenbreite durch Beobachtung der Regressionsfunktion der Schnittkraft, um eine nominale Anzahl von Bohrungen β_{nom} mit dem j -ten Werkzeug zu erreichen. Hierdurch kann der Werkzeugverschleiß $VB(t)$ durch Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit geregelt werden. Mit den experimentell bestimmten Schnittkraft-Kennlinien der Kombination des Werkstück- und Werkzeugmaterials kann der Schneid-Eckenverschleiß auf Basis der aktuell gemessenen Schnittkraft abgeschätzt werden.

Unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit des Ausfalls eines Werkzeugs entsprechend /Tön95/ können die Schnittparameter so angepasst werden, dass die erforderliche Anzahl an Bohrungen erreicht werden kann. Eine so genannte Punktlandung der TTF des Werkzeugs ist im Bereich zwischen der nominal und maximal voreinstellbaren Dauer des Werkzeugzyklus möglich /VDI 3321/.

Die Faktoren Werkstück- und Werkzeugmaterial, Vorschub, Schnitttiefe, Spanwinkel sowie Einstellwinkel sind während der Experimente nicht verändert worden, weshalb ihr Einfluss auf die Schnittkraft und somit auf die Standzeit nicht berücksichtigt werden. Auf Grund ihrer Bedeutung bei der zerspanenden Bearbeitung und der Vollständigkeit halber werden sie aufgeführt. Um den Einfluss von Kühlschmierstoffen (KSS) zu vermeiden und dem Stand der Werkzeugtechnik entsprechende Ergebnisse zu erhalten, ist komplett trocken bearbeitet worden.

Die zu erwartende Schnittkraft F_c kann mit Hilfe der für bestimmte Bearbeitungsprozesse tabellierten spezifischen Schnittkraft k_c berechnet werden. Nach Häuser /Häu73/ sind Schwankungen von 20 % der effektiven Schnittkraft F_{eff} bei gleichem Werkstückmaterial und gleichen Schnittbedingungen nicht ungewöhnlich. Auch wenn die Werkzeuge seit Häusers Aussage intensiv weiterentwickelt worden sind, entstehen bei einem System, dessen Komponenten bis an ihre Leistungsfähigkeit ausgenutzt werden, Schwankungen, die nur durch eine vorzeitliche Reduzierung vermieden oder zum gegebenen Zeitpunkt durch Entlastung geregelt werden können.

Während der Standzeitversuche an einem Bearbeitungszentrum mit Direktantrieb an der Bearbeitungsspindel ist das Motordrehmoment M_m jeder zehnten Bohrung gemessen und die entsprechende Schnittkraft F_c errechnet worden. Bild 6.4 illustriert den fortschreitenden Werkzeugverschleiß $VB(t)$, der durch Beobachtung der aktuell steigenden Schnittkraft F_c bestimmt werden kann und anschließend mit dem Mittelwert der Schnittkraft des entsprechenden Zeitpunkts t vorheriger Schnittkraft-Verschleiß-Kennlinien verglichen wird.

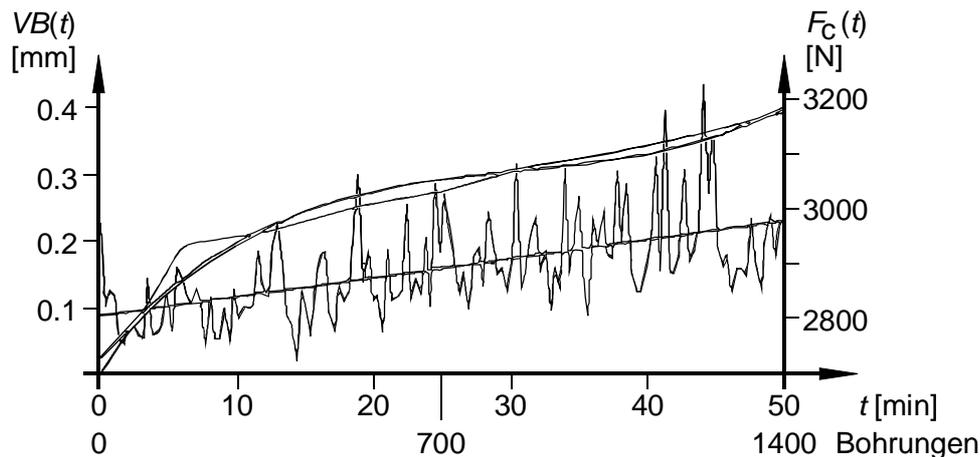


Bild 6.4 Beziehungsschaubild der Verschleißmarkenbreite und seiner Regressionskurve (s-förmiger Graph), der zugewiesenen Schnittkraft (gezackter Graph) und seiner Regressionskurve (linearer Graph) unter Anordnung der Versuchsbohrungen

Nach einer kurzen, vernachlässigbaren Einlaufphase kann der Verschleiß als linear angenommen werden. Auf Grund der Drehzahlregelung ist die Dauer einer Bohrung konstant. Die Abnahme der Schnittfläche wird durch die steigende Schnittkraft und den zunehmenden Vorschubdruck kompensiert.

Bei den beschriebenen Versuchen sind Bohrer mit einem Durchmesser $D = 10,2$ mm und ein unveränderter Vorschub von $f_s = 0,3$ mm/U eingesetzt worden. Zur überschlägigen Berechnung kann entsprechend der Gleichung

$$F_f = 425,7 \cdot D^{1,18} \cdot f_s^{0,73} \quad (6.1)$$

die zu erwartende Vorschubkraft mit $F_f = 2739$ N ermittelt werden /Sau97/. Bild 6.5 zeigt den Aufbau der mechanischen Übertragungsglieder der axialen Bewegung, die den Vorschub des Werkzeugs bewirkt.

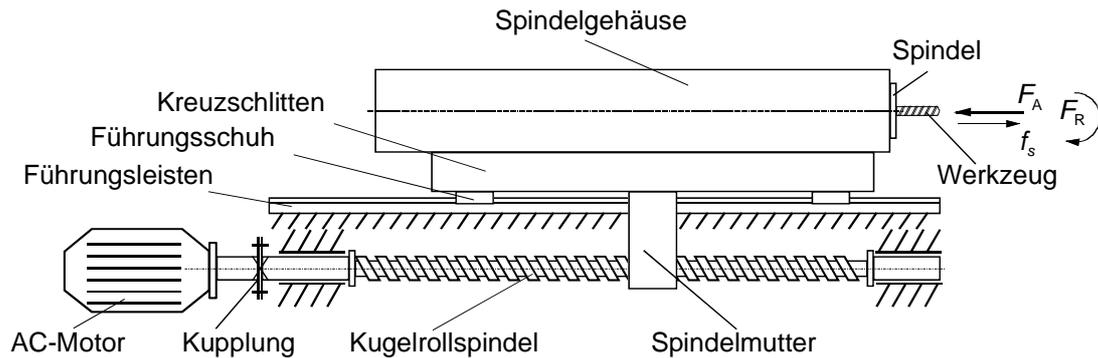


Bild 6.5 Mechanische Übertragung axialer Bewegung; F_A bezeichnet die Axialkraft, F_R die Radialkraft und f_s den Vorschub

Die Vorschubkraft F_f kann, ausgehend vom gemessenen Drehmoment M_{mf} des Motors des Kugelgewindetriebs, ermittelt werden. Dabei sind der Wirkungsgrad beziehungsweise die Reibungsverluste durch die Kraftübertragung an den beweglichen Verbindungsstellen wie

- Führungsleisten,
- Führungsschuhe,
- Kugelrollspindel,
- Spindelmutter,
- Lager und Kupplung der Kugelrollspindel und
- AC-Motor

zu berücksichtigen.

Die Vorschubkraft F_f kann, basierend auf dem gemessenen Drehmoment M_{mf} des AC-Vorschubmotors, durch folgende Gleichung ermittelt werden:

$$M_{mf} = \frac{F_f \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot \eta_{KGWT}} \Rightarrow F_f = \frac{2 \cdot \pi \cdot \eta_{KGWT}}{M_{mf} \cdot h} \cdot M_{mf} \quad (6.2)$$

Das während der Bearbeitung gemessene Motordrehmoment M_{mf} von 12,04 Nm des Kugelgewindetriebs (KGWT) wird um das gemessene Leerlaufdrehmoment M_{L0} mit 1,96 Nm reduziert. Das dann aufgebrachte Motordrehmoment ergibt unter der Berücksichtigung der Spindelsteigung von $h = 20$ mm und einem Wirkungsgrad $\eta_{KGWT} = 0,93$ die axiale Vorschubkraft $F_f = 2945$ N.

In diesem Ansatz wird jedoch mit dem aufgezeichneten Motordrehmoment M_m der direkt angetriebenen Spindel verwendet, da das absolute Schnittmoment M_c , das direkt am Werkzeug entsteht, hat für diesen Ansatz keine maßgebliche Bedeutung und wird

mit dem Motordrehmoment M_m der direkt angetriebenen Motorspindel ungefähr gleichgesetzt, da zwischen dem Werkzeug und der Antriebseinheit kein Getriebe als Absorber fungiert und da die aktuelle Schnittkraftzunahme im Verhältnis zum Mittelwert vorheriger Schnittkraftaufnahmen gesetzt wird. Die Prozessüberwachungseinheit der Maschinenhauptsteuerung nimmt das aktuelle Drehmoment des Motors M_m auf und wandelt es in das nahezu gleiche Schnittmoment $M_c \approx M_m$ um; anschließend in die Schnittkraft F_c nach folgender Gleichung /Tön95/:

$$M_m \approx M_c = \frac{2 \cdot F_c \cdot 0,21 \cdot D}{10^3} \Rightarrow F_c = \frac{M_c \cdot 10^3}{2 \cdot 0,21 \cdot D} \quad (6.3)$$

Zur Bestimmung der Schnittkraft-Kennlinien verschiedener Schnittgeschwindigkeiten sind die Schnittkräfte rechnerisch bestimmt und anschließend durch empirisch erhobene Daten verifiziert worden.

Bild 6.6 zeigt das Bohrbild des Werkstücks mit je 176 Bohrungen von 25 mm Tiefe je Werkstückseite. Das Werkstück ist eine Scheibe von 200 mm Durchmesser und von 65 mm Dicke, so dass beide Seiten bearbeitet werden können. Als Material wurde 42CrMo4V, wegen seiner hohen Festigkeit, die im Stahlschlüssel mit einem Bereich von 790 N/mm^2 bis 930 N/mm^2 angegeben ist und der entsprechenden Verschleißwirkung gewählt. Nach dem Erreichen der maximalen Verschleißmarkenbreite $VB_{\max} = 0,4 \text{ mm}$ ($VB_{0,4}$) sind neue Bohrer der gleichen Charge eingesetzt worden, um Schwankungen durch Nachschleifen und Nachbeschichten der verschlissenen Hartmetall-Wendelbohrer zu vermeiden, so dass die Materialeigenschaften als konstant angesehen werden können.

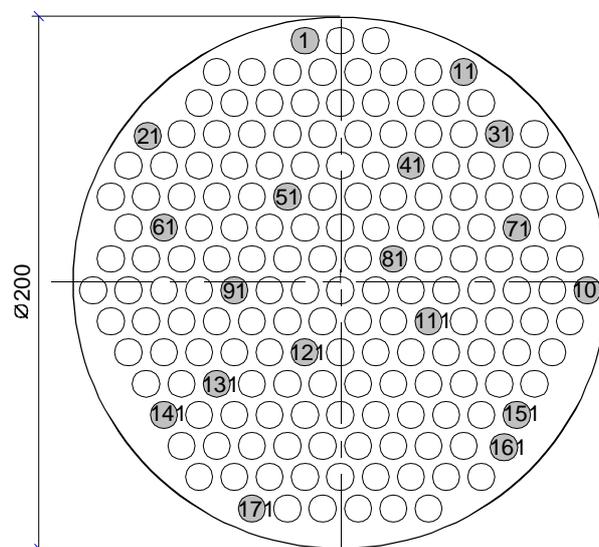


Bild 6.6 Werkstück mit dem Bohrbild der Testbohrungen

Um eine zu große Streuung der Festigkeit zu vermeiden, sind die 131 Versuchswerkstücke von zwei Rundstählen aus einer Charge entnommen worden. Alle Werkstücke sind auf ihre Härte nach Brinell beziehungsweise Vickers geprüft worden, wonach anhand der Tabelle 6.1 die Festigkeit ermittelt werden konnte.

Tabelle 6.1 Umwertungstabelle für Härtewerte und Zugfestigkeit in Anlehnung an /DIN 50150/

Festigkeit σ_B (kg/mm ²)	Vickershärte HV	Brinellhärte HB
86	273	257
87	276	260
88	279	263
89	282	266
90	285	269

Die Festigkeit σ_B der eingesetzten Werkstücke ist zwischen 86 kg/mm² bis 90 kg/mm² gemessen worden, was einer Zugfestigkeit R_m von 845 N/mm² bis 884 N/mm² entspricht. Diese relativ geringen Festigkeitsschwankungen zwischen den Versuchswerkstücken werden dadurch erreicht, dass nur aus einer Charge Material entnommen wird, um Ausreißer zu vermeiden. Jedoch sind die Festigkeitsunterschiede im Material selbst nicht beeinflussbar. Die Festigkeit der Werkstücke verringert sich von außen bis zum Kern, was Schwankungen bei den Drehmomentaufnahmen über die gesamte Betriebsdauer eines Werkzeuges bewirkt. Um mit den Drehmomentwerten arbeiten zu können, wurden diese Schwankungen gefiltert, d. h. an die Betriebsdauerdaten aller Werkzeuge wurde eine Trendlinie mit Hilfe des gleitenden Durchschnittes oder eine lineare Regression angepasst.

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass der TTF_j -Wert des j -ten Werkzeuges durch Messung oder Beobachtung physikalischer Werte bestimmt werden kann. Der TTF -Wert hängt hauptsächlich von der Genauigkeit beim Nachschleifen und dem folgenden Nachbeschichtungsprozess der Bohrer sowie von den Schwankungen zwischen den individuellen Werkstückchargen (Blasenbildung, Einschlüsse, Werkstückhärteunterschiede) ab.

Die Parameter Vorschub mit $f_s = 0,3$ mm, Schnitttiefe mit $a_p = 5,1$ mm, bei einem Durchmesser des Bohrers von $D = 10,2$ mm und einer Bohrtiefe $l_\beta = 25$ mm, sind unverändert gehalten worden. Jede Bohrung benötigt $l_\beta / f_s = 83,3$ Umdrehungen.

6.2 Versuchsergebnisse

In einer ersten Versuchsreihe mit drei beschichteten Hartmetallwendelbohrern sind die Bohrungsanzahl bis zum Ausfall der Bohrer 1 bis 3 (Number of Borings to Failure, $NTF_{1,2,3}$) bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 60$ m/min (v_{60}), entsprechend einer Drehzahl $n_{rot} = 1.872$ min⁻¹, ermittelt worden. Mit einer Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 561,6$ m/min werden $t_c = 2,7$ Sekunden je Bohrung benötigt. In der zweiten Versuchsreihe sind die $NTF_{4,5,6}$ der Bohrer 4 bis 6 mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 90$ m/min (v_{90}), der entsprechenden Werkzeugdrehzahl von $n_{rot} = 2.809$ min⁻¹, einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 842,7$ m/min und einer resultierenden Schnittzeit von $t_c = 1,8$ Sekunden je Bohrung durchgeführt worden. Tabelle 6.2 zeigt die Bohrungsanzahl je Bohrer bei Erreichen der definierten Verschleißmarkenbreite $VB_{0,4}$.

Tabelle 6.2 Versuchsergebnisse der Bohrer 1 bis 3 (v_{60}) und der Bohrer 4 bis 6 (v_{90})

Bohrer	Bohrungen	Bohrer	Bohrungen
1	2467	4	835
2	1792	5	691
3	1552	6	528
$MNTF_{60} = 1937$		$MNTF_{90} = 684,67$	

Die mittlere Bohrungsanzahl bis zum Ausfall ($MNTF_{60}$) der Bohrer 1 bis 3 wird durch $MNTF_{60} = 1937$ und der Bohrer 4 bis 6 durch $MNTF_{90} = 684,67$ dargestellt. Die Abweichungen in den verschiedenen Ergebnissen zeigen, dass statistisch eine zu geringe Anzahl an Versuchen mit jeder einzelnen Schnittgeschwindigkeit durchgeführt worden ist, jedoch genügen diese Serien als Verbindungspunkte für weitere experimentelle Ergebnisse, um die Lage der Taylor-Geraden in Bild 6.7 festzulegen.

In einer dritten Versuchsreihe sind die NTF_{7-36} einer statistisch genügenden Anzahl von 30 Bohrern bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 75$ m/min (v_{75}), der entsprechenden Werkzeugdrehzahl von $n_{rot} = 2.341$ min⁻¹, einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 702,3$ m/min und einer resultierenden Schnittzeit von $t_c = 2,1$ Sekunden je Bohrung bestimmt worden. Tabelle 6.3 zeigt die Bohrungsanzahl je Bohrer bei Erreichen der Verschleißmarkenbreite $VB_{0,4}$.

Tabelle 6.3 Versuchsergebnisse der Bohrer 7 bis 36 mit $v_c = 75$ m/min

Bohrer	Bohrungen	Bohrer	Bohrungen
7	880	22	1056
8	1408	23	1760
9	834	24	1760
10	880	25	1232
11	880	26	1056
12	555	27	1056
13	848	28	2640
14	880	29	1584
15	880	30	1056
16	1056	31	1584
17	1232	32	1408
18	880	33	1936
19	1056	34	1408
20	1408	35	1760
21	1408	36	1760
$MNTF_{75} =$			1271,37

Die Versuche mit einer Schnittgeschwindigkeit von 75 m/min ergaben eine mittlere Bohrungsanzahl $MNTF_{75}$ von 1271,37 Bohrungen. Die Bohrungsanzahl der $MNTF$ kann in eine Zeiteinheit ermittelt werden, wenn sie mit ihrer entsprechenden Schnittzeit t_c multipliziert werden; daraus resultieren $MTTF_{60} = 87,17$ min, $MTTF_{75} = 44,5$ min und $MTTF_{90} = 20,54$ min. Bild 6.7 zeigt die $MTTF$ und deren Regressionsgerade in einem doppelt logarithmischen Koordinatensystem. Dabei liegen die $MTTF$ nahe bei der angenäherten Regressionsgeraden, wobei der Steigungskoeffizient durch die Gleichungen

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \quad (6.4)$$

bestimmt werden kann und dem Gradienten k_T der Taylor-Gerade aus Gleichung 3.8 entspricht.

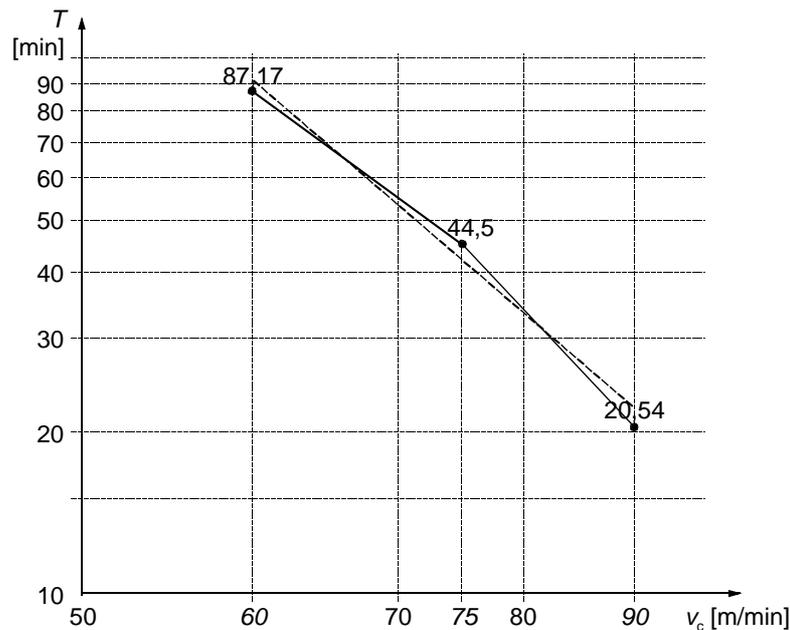


Bild 6.7 Taylor-Gerade als Ergebnis der Regressionsgleichung der drei *MTTF*

Mit dem Gradient m kann die Ordinate ermittelt werden, bei dem die Taylor-Gerade die Ordinatenachse mit einer Standzeit von $T = 1$ min schneidet. Werden die *MTTF* in Gleichung 3.8 eingesetzt, resultieren $m = k_T = 3,545$ und $\log C_T = 8,301$. Der Korrelationskoeffizient $r^2 = 0,9501$ ist ein Gütemaß für die Übereinstimmung der angenommenen Geraden auf Basis der empirisch ermittelten Werte, wobei die vorliegende Gerade eine relativ gute Näherung der Beziehung T zu v_c mit einem Standardschätzfehler von $s_{T,v} = 7,428$ min darstellt. Verschiedene Kombinationen der Anfangspunkte und ihre Werte der Regressionsfunktionen sind in Tabelle 6.4 dargestellt.

Tabelle 6.4 Korrelation der unterschiedlichen Regressionsgleichungen

	r^2	$s_{T,v}$
Regressionsgleichung mit v_{60} und v_{75}	0,9869	2,974 m/min
Regressionsgleichung mit v_{60} und v_{90}	0,9889	2,977 m/min
Regressionsgleichung mit v_{75} und v_{90}	0,8697	15,853 m/min
Regressionsgleichung mit v_{60} , v_{75} und v_{90}	0,9501	7,428 m/min

Die Regressionsgleichungen mit den Punkten v_{60} , v_{75} oder den Punkten v_{60} , v_{90} haben einen sehr hohen Korrelationskoeffizienten r^2 und einen vergleichsweise niedrigen Standardschätzfehler $s_{T,v}$, verglichen mit dem Korrelationskoeffizienten und dem Standardschätzfehler der Regressionsgleichung mit den Punkten v_{75} , v_{90} , welches darauf zurückzuführen ist, dass die Datensätze mit v_{60} und v_{90} nur aus jeweils drei Bohrern bestehen. Unter Berücksichtigung, dass die Versuchsreihen mit v_{60} und v_{90} nur mit drei

Bohrern und die Reihe mit v_{75} aus 30 Bohrern durchgeführt worden sind, ist die Regressionsgerade zwischen den Punkten v_{60} und v_{75} plausibler, auch wenn der Korrelationskoeffizient der Regressionsgleichung zwischen den Punkten v_{60} und v_{90} minimal besser ist. Die Parameter der Taylor-Geraden sind dann $m = 3,015$ und $\log C_T = 7,301$. Die Regressionsgleichungen aller Bohrer jedes Datensatzes sind erstellt worden, um eine allgemeine Beziehung zwischen der Schnittkraft F_c bzw. dem Schnittmoment M_c und der Standzeit T und der Schnittgeschwindigkeit v_c zu bestimmen. Bild 6.8 zeigt die Kennlinien der Schnittmomente und Bohrungen und in gestrichelter Linie die entsprechenden Standardabweichungen von v_{60} , v_{75} und v_{90} .

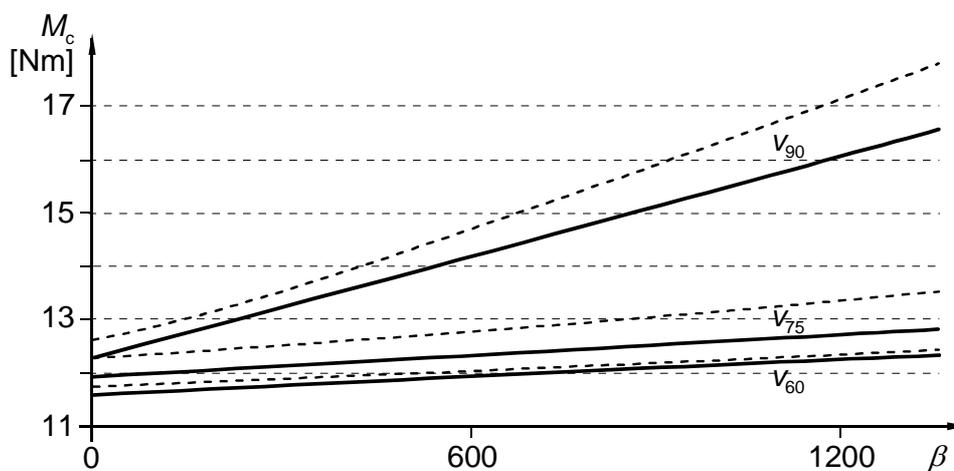


Bild 6.8 Reihe der Schnittmoment-Kennlinien (Regressionsgeraden) $v_{60} < v_{75} < v_{90}$, deren Anzahl produzierter Bohrungen β und deren jeweilige Schnittmomente M_c

Auf Grund der ausreichenden Stichprobenanzahl der Datensätze mit v_{75} wird die empirische Standardabweichung s_{75} als repräsentativ für einen Verlauf des mittleren Drehmoments angenommen, deren Kennlinien einer Geraden mit der Funktion

$$s_{75}(\beta) = 0.008 \cdot \beta + 12.165 \quad (6.5)$$

entspricht. Bei einer mittleren Bohrungsanzahl $MNTF_{75} = 1271,37$ ist eine empirische Standardabweichung von $s_{75} = 0,4439$ Nm des Schnittmoments ermittelt worden.

Durch Interpolation ist es möglich, eine Matrix mit Zwischenstufen oder eines Kennlinienfeldes verschiedener Schnittgeschwindigkeiten, der Anzahl produzierter Bohrungen β und dem entsprechenden Schnittmoment M_c zu erstellen. Als Ausgangsbasis dienen die Regressionsgeraden der empirisch ermittelten Schnittmomente bei den Schnittgeschwindigkeiten v_{75} und v_{60} , die nahezu parallel sind, mit den folgenden Funktionen:

$$M_{c75}(\beta) = 0.005 \cdot \beta + 11.928 \quad (6.6)$$

$$M_{c,60}(\beta) = 0.0056 \cdot \beta + 11.538 \quad (6.7)$$

Zur Bestimmung einer Momenten-Kennlinie zur Schnittgeschwindigkeit v_c wird über den Dreisatz

$$\frac{M_{c,v}(\beta) - M_{c,60}(\beta)}{M_{c,75}(\beta) - M_{c,60}(\beta)} = \frac{v_c - v_{60}}{v_{75} - v_{60}} \quad (6.8)$$

zunächst das gesuchte Schnittmoment $M_{c,v}(\beta)$ bezogen auf die Anzahl der produzierten Bohrungen β ermittelt. Um die Schreibweise zu verkürzen, werden die folgenden Differenzen eingeführt:

$$\frac{M_{c,v}(\beta) - M_{c,60}(\beta)}{\Delta M_{c,60,75}(\beta)} = \frac{\Delta v_{60,c}}{\Delta v_{60,75}} \quad (6.9)$$

Damit folgt für das Schnittmoment $M_{c,v}(\beta)$

$$M_{c,v}(\beta) = M_{c,60}(\beta) + \frac{\Delta M_{c,60,75}(\beta)}{\Delta v_{60,75}} \cdot \Delta v_{60,c} \quad (6.10)$$

Kennlinienfelder werden im Allgemeinen mit einer Abstufung von $\Delta v_c = 1$ m/min angegeben. Bild 6.9 zeigt Schnittmoment-Kennlinien zwischen v_{60} und v_{90} mit ihren Zwischenstufen.

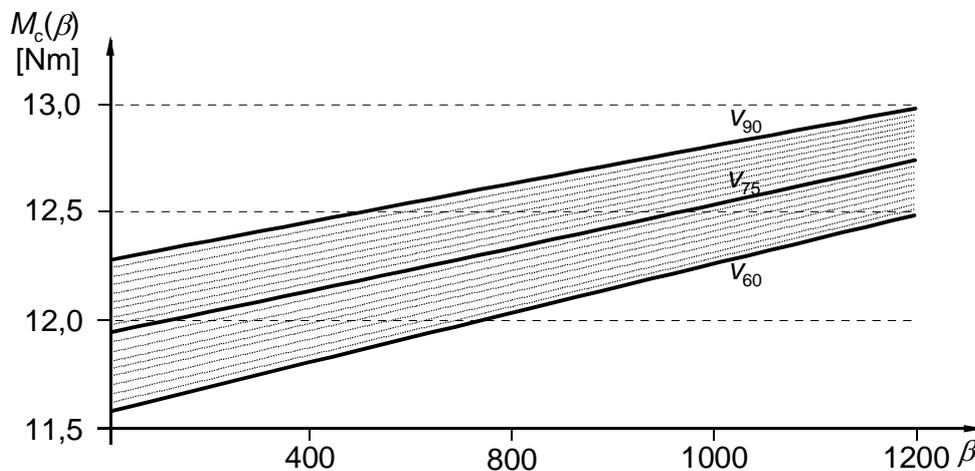


Bild 6.9 Schnittmoment-Kennlinien mit ihren interpolierten Schnittgeschwindigkeiten bezogen auf die Anzahl produzierter Bohrungen β und dem Schnittmoment $M_C(\beta)$

Die Korrelation zwischen Freiflächenverschleiß und Schnittkraft erlaubt nach einer bereits produzierten Anzahl von Bohrungen seit dem letzten Werkzeugwechsel χ eine Aussage darüber, ob unter dem Aspekt der Bohrungsanzahl die vorgegebenen Zuverlässigkeitsanforderungen erreicht werden. Damit kann nach χ produzierten Bohrungen

prognostiziert werden, wie viele Bohrungen $\beta_{\text{prgn}}(\chi)$ noch mit dem j -ten Werkzeug durchgeführt werden können, siehe auch Bild 6.10.

Die Beziehungen zwischen Betriebsdauer, Belastung und Drehzahl haben Czichos und Habig /CzHa92/ anhand eines Festschmierstofffilms illustriert. Der Verschleiß der Feststoffschmierichten nimmt in der Regel mit steigender Belastung und Geschwindigkeit zu, so dass die Betriebsdauer dementsprechend mit beiden Beanspruchungsgrößen abnimmt. Auch bei Festschmierstoffen auf Basis von Molybdändisulfid hat die Geschwindigkeit einen stärkeren Einfluss auf die Betriebsdauer als die Belastung.

Bild 6.10 illustriert unterschiedliche Schnittgeschwindigkeiten $v_{60} < v_{75} < v_{90}$ mit ihren angenäherten Schnittmomenten und die Anzahl produzierbarer Bohrungen.

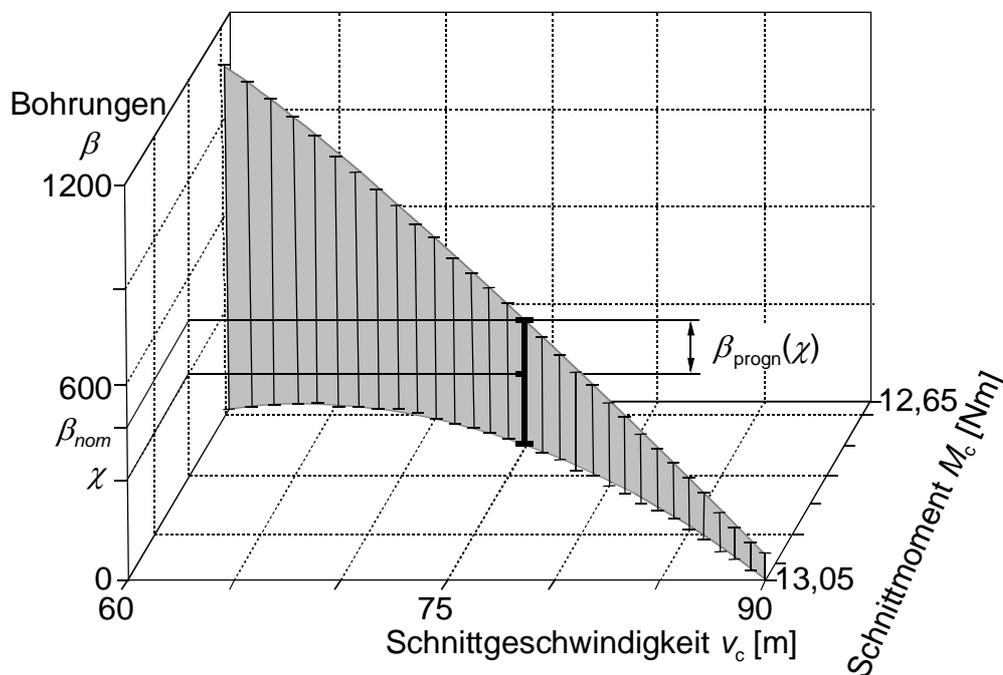


Bild 6.10 Bohrungsanzahl β bezogen auf verschiedene Schnittgeschwindigkeiten v_c und der entsprechende Schnittmoment M_c . Nach χ durchgeführten Bohrungen werden noch $\beta_{\text{prgn}}(\chi)$ weitere Bohrungen prognostiziert.

Um die Ausbringung einer Transferlinie zu erhöhen, wird die *TTF* der Werkzeuge an den einzelnen Stationen so angepasst, dass möglichst viele verschlissene Werkzeuge an unterschiedlichen Stationen gleichzeitig gewechselt werden können.

Das vorliegende Kapitel illustriert eine Abschätzung der Zuverlässigkeit von Bohrern unter Anwendung des Taylor-Ansatzes. Damit kann ein Werkzeug, welches den Grenzwert seiner Schnittkraft zu überschreiten droht, durch Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit seine vorgegebene Anzahl an Werkstücken erreichen. Mittels des Taylor-Ansatzes aus dem Diagramm in Bild 6.7 lässt sich die Anzahl der noch durchzuführen-

den Bohrungen $\beta_{\text{prgn}}(\chi)$ bei unterschiedlichen Schnittgeschwindigkeiten v_c bis zum Erreichen der maximalen Verschleißmarkenbreite VB_{max} prognostizieren.

Die Differenz zwischen der vorgegebenen Anzahl Bohrungen β_{nom} bis zum nächsten Werkzeugwechsel und den bereits produzierten Bohrungen χ seit dem letzten Werkzeugwechsel wird mit der vorgegebenen Bohrungsanzahl β_{nom} verglichen. Wird keine negative Differenz festgestellt, so ist keine Änderung der Schnittparameter erforderlich. Wird jedoch eine negative Änderung diagnostiziert, muss das Werkzeug entlastet werden indem die Schnittgeschwindigkeit reduziert wird, so dass die vorgegebene Bohrungsanzahl β_{nom} trotzdem erreicht wird. Außerdem kann eine zuverlässigkeits-adaptive Regelung (Reliability-Adaptive Control, RAC) auf andere Anwendungsbereiche, die Verschleiß unterworfen sind, wie zum Beispiel Lager, Getriebe und sogar Hochtemperaturschmierstoffe übertragen werden /CzHa92/.

Die angeführten Aspekte führen zu der Schlussfolgerung, dass die *TTF* eines Bohrers während der Bearbeitung auf Basis seiner Schnittkräfte bestimmbar ist. Versuchsreihen haben gezeigt, dass die *TTF* auch bei nicht konstanten Materialeigenschaften als entscheidend angesehen werden kann. Wenn diese Anforderungen erreicht werden, kann die Verfügbarkeit z.B. von Transferlinien durch ein RAC erhöht werden. Je mehr Datensätze die Datenbasis erhält, umso genauer ist der Mittelwert der Taylor-Gleichung, desto präziser ist eine Prognose der noch produzierbaren Werkstücke möglich. Dabei kann der aktuelle Freiflächenverschleiß entweder optisch in bestimmten Intervallen gemessen oder mit Hilfe der Regressionsgleichung der Schnittkraft beobachtet werden.

Die Schnittkraft-Kennlinie der jeweiligen Materialkombination von Werkzeug und Werkstück sollte, wie zuvor gezeigt, experimentell bestimmt werden. Auf diesem Weg kann der Schneid-Eckenverschleiß auf Basis der aktuell gemessenen Schnittkraft abgeschätzt werden. Durch schrittweise Näherung lässt sich eine Matrix mit Zwischenstufen der verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten in Übereinstimmung der produzierten Werkstücke und der entsprechenden Schnittkraft erzeugen. Dadurch kann vorhergesagt werden, wie viele Werkstücke noch produziert werden können, bis ein Werkzeugwechsel erforderlich ist. Die Korrelation des Freiflächenverschleißes und der Schnittkraft ermöglicht eine Aussage darüber, ob unter dem Aspekt der Bohrungsanzahl die vorgegebenen Zuverlässigkeitsanforderungen erreicht werden. Unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit des Werkzeug-Ausfalls können die Schnittparameter so angepasst werden, dass die vorgegebene Bohrungsanzahl erreicht wird und eine so genannte

„Punktlandung“ der *TTF* des Werkzeugs im Bereich zwischen der nominalen und maximalen Dauer des Werkzeugzyklus ermöglicht /DiRa04/.

Wie oben dargelegt, steht der Verschleiß in direkter Beziehung zu der Werkzeug-Zuverlässigkeit. Unterschreitet ein Werkzeug eine vorgegebene Spezifikation, so gilt seine Funktion als nicht weiter erfüllt, was einen Werkzeug-Ausfall bedeutet.

Für jeden Zeitpunkt $t \geq \tau_{j,0}$ kann die Aussage getroffen werden, ob die vorgegebenen Anforderungen in Form der Bohrungsanzahl aktuell erreicht werden; des Weiteren kann prognostiziert werden, wie viele Bohrungen noch produziert werden können, bis die maximale Verschleißmarkenbreite VB_{\max} erreicht ist.

Die Schnittkraft-Kennlinien der jeweiligen Materialkombination von Werkzeug und Werkstück sind entweder bekannt oder müssen wegen des Fortschritts in der Materialentwicklung von Werkzeug und Werkstück individuell bestimmt werden. Mit diesen Kennlinien kann der Schneid-Eckenverschleiß auf Basis der gemessenen Schnittkraft bestimmt werden.

Werden diese Aspekte zusammengefasst, so kann die *TTF* während der Bearbeitung mit Hilfe der Schnittkraftwerte ermittelt werden. Die zuvor beschriebenen Versuchsreihen haben gezeigt, dass sogar für nicht konstante Material-Kennlinien die Zeit bis zum Ausfall des Werkzeugs in Bezug auf den Freiflächenverschleiß als a priori bestimmbar betrachtet werden kann. Werkzeug Ausfallarten wie Ausbrüche und Durchbrüche, die eine sofortige Instandhaltung erfordern, werden in diesem Ansatz nicht betrachtet.

7 Konzeption eines Verschleißregelungssystems für eine Transferlinie

Der Zerspanungsprozess kann durch den Einsatz von Sensoren beobachtet werden, um die Schnittbedingungen entsprechend dem Optimierungsziel *Werkzeugwechsel-Strategie* bei inakzeptablen Abweichungen vom normalen Zerspanungsverhalten außerhalb eines Grenzbereichs anzupassen. In Bild 7.1 sind Messgrößen einer Optimierungsregelung dargestellt, von denen der Werkzeugverschleiß und die Zerspankraftkomponenten über eine Korrelationsfunktion direkt zur Optimierung und die anderen Messgrößen zur Überwachung der Grenzen des Regelbereichs eingesetzt werden können.

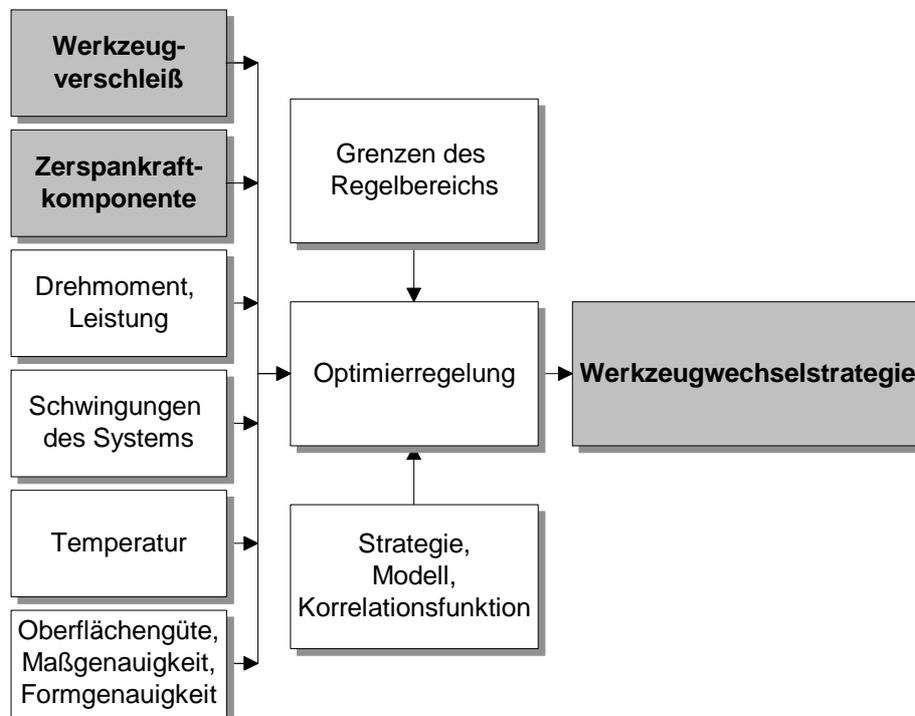


Bild 7.1 Überwachung und Führung der Werkzeugwechselstrategie durch Optimierungsregelung in Anlehnung an /Kön84/

König /Kön84/ hat die Verschleißmessung als kritisch in dieser Optimierungsregelung genannt, da zu dieser Zeit noch keine ausreichend leistungsfähigen Messsysteme entwickelt waren. Im Gegensatz dazu sind heute mehrere Arten der indirekten Verschleißmesssysteme, wie in Kapitel 4 beschrieben, im praktischen Einsatz und in ständiger Weiterentwicklung. Ein weiterführender Schritt wäre der permanente Abgleich der Messwerte mit einer Korrelationsfunktion, die sich den ändernden Messwerten anpasst, um eine möglichst präzise Aussage über den aktuellen Verschleiß des Werkzeugs treffen zu können.

Eine Transferlinie (TL) zeichnet sich dadurch aus, dass sie aus einer begrenzten Anzahl an Stationen besteht, von denen jede simultan spezifische Bearbeitungen an Werkstücken durchführt. Wenn alle fertigungstechnischen Arbeitsvorgänge abgeschlossen sind, werden alle Werkstücke gleichzeitig mit Hilfe einer Transferstange zur jeweilig nächsten Station befördert. Die erforderliche Zeit für den Transfer wird in diesem Ansatz vernachlässigt. Die Station mit der langsamsten Bearbeitung bestimmt die Dauer eines Werkstück-Zyklus. Die betreffende Transferlinie besitzt keine Werkstück-Puffer, die einen signifikanten Einfluss auf die System-Verfügbarkeit hat.

Zur Erhöhung der Ausbringung einer TL wird die Standzeit (TTF) der Werkzeuge jeder einzelnen Station so abgestimmt, dass ein Maximum an Werkzeugen unterschiedlicher Stationen gleichzeitig gewechselt werden kann.

Durch Lastreduzierung auf das Werkzeug kann eine grobe Anpassung der TTF erreicht werden. Wenn z. B. die Schnittgeschwindigkeit eines Bohrers reduziert wird, erhöht dieses zwar die Bearbeitungsdauer (Taktzeit) pro Werkstück, aber auch die maximale Anzahl von Werkstücken, die mit diesem Bohrer gefertigt werden können. Dieser Effekt wird genutzt, um die System-Verfügbarkeit einer TL zu erhöhen.

Zunächst wird eine einzelne Station betrachtet, bei der der Verschleiß des Werkzeugs an die Zuverlässigkeit angepasst wird, um eine vorgegebene Betriebsdauer des Werkzeugs zu erreichen. Es wird eine so genannte Punktlandung (spot landing) der TTF des Werkzeugs im Bereich zwischen *nominaler* und *maximaler Voreinstellung* der Dauer eines Werkzeug-Zyklus diskutiert. Zur Illustration dienen die in Kapitel 6 dargestellten Ergebnisse mit Spiralbohrern, wobei dieser Ansatz jedoch auch auf andere zerspanende Werkzeuge und Anwendungen übertragen werden kann.

7.1 Werkzeugeigenschaften

Die nominale Werkstückanzahl ω_{nom} ist für alle Zyklen $j = 0, 1, \dots, m$ konstant. Zu Beginn eines Zyklus entspricht die prognostizierte Werkstückanzahl $\omega_{\text{prgn}}(k)$ der nominalen; es gilt $\omega_{\text{prgn}}(0) = \omega_{\text{nom}}$. Die Variable k repräsentiert die Anzahl der bereits produzierten *Werkstücke* und ist nicht mit der Anzahl der bereits produzierten *Bohrungen* χ (siehe Kapitel 6) zu verwechseln. Infolge der Dauer eines Werkzeugwechsels ist $\tau_{j, \omega_{\text{nom}}} < \tau_{j+1, 0}$ mit $\tau_{j, \omega_{\text{nom}}} \equiv \tau_j$ zur Vereinfachung. Das Produkt aus der nominalen Anzahl von Werkstü-

cken ω_{nom} und der Dauer des k -ten Werkstück-Zyklus (Taktzeit) \mathcal{G}_j ergibt die minimale Nenndauer $\eta_{\text{min}} = \omega_{\text{nom}} \cdot \mathcal{G}_j$ mit $\mathcal{G}_j \equiv \mathcal{G}_{j,1} = \mathcal{G}_{j,2} = \dots = \mathcal{G}_{j,k} = \dots = \mathcal{G}_{j,\omega_{\text{nom}}}$.

Die effektive Dauer, um ω Werkstücke im j -ten Werkzeug-Zyklus zu produzieren, ist

$$\eta_j = \sum_{k=1}^{\omega} \mathcal{G}_{j,k} \cdot \quad (7.1)$$

Die wichtigsten verwendeten Maßgrößen sind in Bild 7.2 grafisch dargestellt.

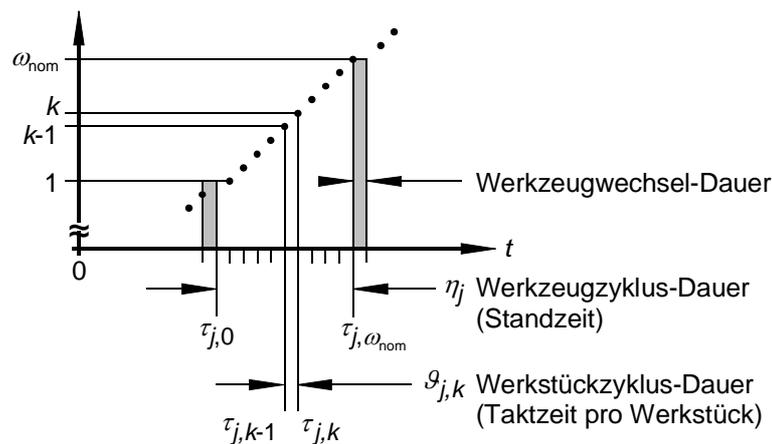


Bild 7.2 Illustration wichtiger verwendeter Maßgrößen

Wie in Kapitel 6 gezeigt, kann davon ausgegangen werden, dass die *TTF* eines Werkzeugs durch Messen oder Beobachten physikalischer Werte prognostiziert werden kann. Wenn das Maximum des Freiflächenverschleißes VB_{max} erreicht ist, wird dieses als ein *Werkzeug-Ausfall* im Sinn einer "Beendigung der Fähigkeit einer Einheit, eine geforderte Funktion zu erfüllen" der IEC 60050-191-04-01 /IEC 60050/ betrachtet, wobei der Wert VB_{max} an die Anforderungen der Bearbeitungsqualität angepasst wird. Die in Kapitel 6 diskutierten Versuchsreihen haben gezeigt, dass eine Korrelation zwischen dem Freiflächenverschleiß und der Schnittkraft besteht. Somit kann der aktuelle Freiflächenverschleiß $VB(t)$ entweder optisch in bestimmten Intervallen gemessen oder auf Basis der Regressionsgerade der Schnittkraft F_C beobachtet werden.

Der Verschleiß steht in direkter Beziehung zur Komponenten-Zuverlässigkeit. Unterschreitet ein Werkzeug eine vorgegebene Spezifikation, so gilt seine Funktion als nicht weiter erfüllt, welches als Werkzeug-Ausfall festgelegt wird.

Für jeden Zeitpunkt $t \geq \tau_{j,0}$ kann die Aussage getroffen werden, ob die vorgegebenen Anforderungen in Form der Bohrungsanzahl *aktuell* erreicht sind. Nach k gefertigten

Werkstücken kann prognostiziert werden, wie viele Werkstücke $\omega_{\text{prgn}}(k)$ noch produziert werden können, bis ein Werkzeugwechsel erforderlich ist.

Die Differenz zwischen der nominal zu produzierenden Werkstückanzahl ω_{nom} bis zum nächsten Werkzeugwechsel und der Anzahl k von Werkstücken, die seit dem letzten Werkzeugwechsel im Intervall $[\tau_{j,0}; t]$ produziert worden sind, wird mit der Anzahl $\omega_{\text{prgn}}(k)$ verglichen. Wenn $\omega_{\text{nom}} - k \leq \omega_{\text{prgn}}(k)$ erfüllt ist, dann besteht keine Notwendigkeit die aktuellen Schnittparameter zu ändern. Gilt jedoch $\omega_{\text{nom}} - k > \omega_{\text{prgn}}(k)$, dann muss eine Lastminderung des Werkzeugs durch Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit durchgeführt werden, so dass die erforderliche Werkstückanzahl ω_{nom} dennoch erreicht werden kann. In diesem Fall wird ein Anstieg der Dauer der restlichen Werkstück-Zyklen $\mathcal{G}_{j,k+1}, \mathcal{G}_{j,k+2} \dots$ bis zum nächsten Werkzeugwechsel akzeptiert. Im Allgemeinen wird jedes Werkzeug verwendet, bis die maximale Verschleißmarkenbreite VB_{max} erreicht ist. Bei optimalen Bedingungen wird eine Mindestdauer $\eta_{\text{min}} = \omega_{\text{nom}} \cdot \mathcal{G}_j$ mit $\mathcal{G}_j \equiv \mathcal{G}_{j,1} = \mathcal{G}_{j,2} = \dots = \mathcal{G}_{j,\omega_{\text{nom}}}$ benötigt, um ω_{nom} Werkstücke zu produzieren.

Die in Kapitel 6 vorgestellten Ergebnisse der durchgeführten Experimente an Spiralbohrern haben gezeigt, dass die Betriebsdauern als logarithmisch normal verteilt angesehen werden können. Für den folgenden Ansatz werden die Werkzeuge in drei Kategorien klassifiziert. Dabei bezeichnet a ("gut") den Fall eines Verschleißes in akzeptablem Bereich und b ("schlecht") bzw. c ("sehr schlecht") den Fall von inakzeptablem Verschleiß, siehe Skizze in Bild 7.3.

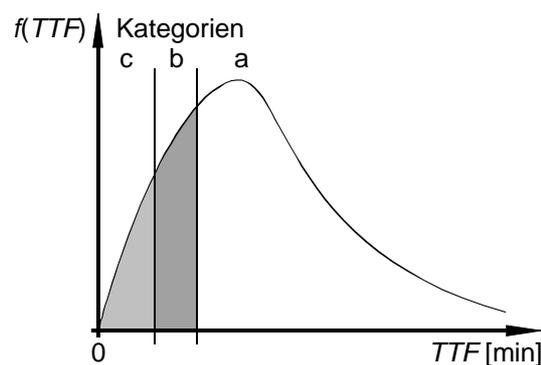


Bild 7.3 Skizze zur Anwendung der Verschleißkategorien bezogen auf eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion /DiRa05/

7.2 Optimierung der Zerspanung durch zuverlässigkeits-adaptive Regelung

Die Produktionsausbringung einer Transferlinie wird zum einen stark durch die TTF des Werkzeugs zum anderen durch die Stillstandzeit auf Grund von Werkzeugwechsel beeinflusst. Genauso wie die TTF als bestimmbar angenommen wird, gilt für Optimierungszwecke die Bestimmbarkeit der $TTF = \eta_{\min}$ zum Zeitpunkt $\tau_{j,0}$. Um die System-Stillstandzeit zu minimieren, wird die TTF des Werkzeugs jeder einzelnen Station so angepasst und harmonisiert, dass ein Maximum an Werkzeugen in verschiedenen Stationen gleichzeitig instand gehalten werden kann. In diesem *Werkzeugwechsel-Management-System* ist für jede Station eine maximale Werkzeug-Zyklus-Dauer $\eta_{\max}(j)$ mit $\eta_{\min} < \eta_{\max}(j)$ festgelegt, bis zu der die Harmonisierung der Stationen nicht verletzt wird. Für jeden Werkzeugwechsel j wird der Wert $\eta_{\max}(j)$ vom Werkzeugwechsel-Management-System neu berechnet und vorgegeben. Die minimale Nenndauer η_{\min} bleibt konstant.

Wenn die Leistung und somit auch die Belastung auf das Werkzeug durch Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit entsprechend $\omega_{\text{hom}} - k > \omega_{\text{prgn}}(k)$ herabgesetzt wird, so kann die TTF die Nenndauer η_{\min} erreichen oder sogar überschreiten. Jedoch ist die Lastminderung durch die obere Grenze η_{\max} limitiert. Eine akzeptable *time to failure* ist gegeben, wenn das vorgegebene Ziel $\eta_{\min} \leq TTF \leq \eta_{\max}(j)$ erreicht ist (die so genannte Punktlandung der TTF). Wenn die TTF einen geringeren Wert als die vorgegebene Dauer des Werkzeug-Zyklus mit $TTF < \eta_{\min}$ erreicht, ist ein nicht-deterministischer (stochastischer) Werkzeug-Ausfall wie zum Beispiel ein Ausbruch oder Werkzeugbruch aufgetreten.

Wenn gilt $TTF > \eta_{\max}(j)$, war der Verschleiß zu groß und bei der erforderlichen Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit zum Erreichen einer akzeptablen TTF unterschreitet die Drehzahl einen physikalisch zulässigen Grenzwert. In beiden Fällen ist die Harmonisierung verletzt, was zu signifikantem Rückgang der System-Verfügbarkeit führt.

In allen folgenden *Modul-Betriebsstrategien* müssen zwei Anforderungen, die von der *System Betriebsstrategie* vorgegeben sind, betrachtet werden: die vorgegebene Anzahl zu produzierender Werkstücke ω_{hom} und der letztmögliche Zeitpunkt $\eta_{\max}(j)$, an dem der nächste Werkzeugwechsel durchzuführen ist.

7.2.1 Modul-Prozess-Strategie

Eine einfache *Modul-Prozess-Strategie* ist intuitiv aus Experimenten gewonnen worden, wobei über ein Schnittkraft-Zeit-Diagramm mit Kennlinien verschiedener Schnittgeschwindigkeiten einer bestimmten Kombination von Schnittkraft und Schnittgeschwindigkeit ein Zeitpunkt beziehungsweise eine Werkstückanzahl zugewiesen werden kann. Wie in Kapitel 6 diskutiert, kann die aktuelle Verschleißmarkenbreite $VB(t)$ mit Hilfe der Regressionsgleichung der Schnittkraft F_c beobachtet werden. Bild 7.4 illustriert, dass im regulären Betriebsmodus das k -te Werkstück einer bestimmten Schnittkraft zugewiesen wird, die der Kennlinie der Schnittgeschwindigkeit v_{c1} entspricht.

Wenn im Intervall $[\tau_{j,k-1}, \tau_{j,k}]$ eine gering geglättete Funktion von F_c eine vorgegebene Konfidenzgrenze auf Grund von *irregulärem* Verschleiß überschreitet, kann die aktuelle Schnittkraft der Kennlinie von Schnittgeschwindigkeit v_{c2} mit $v_{c2} > v_{c1}$ für $t \geq \tau_j$ zugeordnet werden, wobei das Konfidenzintervall frei wählbar ist. Je enger die Intervallgrenzen an v_{c1} gesetzt sind, umso größer ist die Wirkung der Werkzeugverschleißregelung und desto genauer ist die Punktlandung. Dabei könnte jedoch die effektive Dauer η_j die maximale voraussichtliche Dauer $\eta_{\max}(j)$ des Werkzeug-Zyklus überschreiten. Wenn die Kennlinie der Schnittgeschwindigkeit v_{c2} nicht bekannt ist, kann diese, wie in Kapitel 6.1.2 erörtert, über die gegebene Funktion von v_c interpoliert werden.

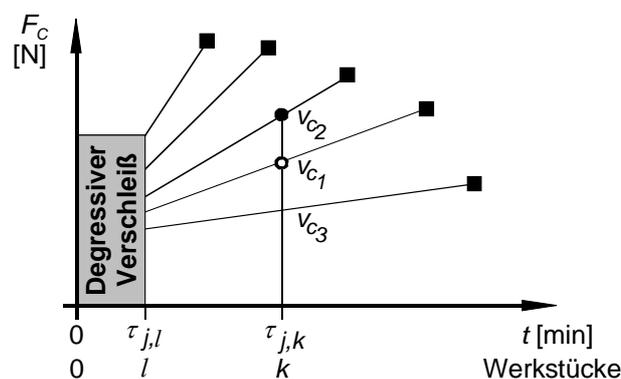


Bild 7.4 Kennlinien verschiedener Schnittgeschwindigkeiten in einem Schnittkraft-Zeit-Diagramm; Werkstücke sind zusätzlich an der Abszisse ausgewiesen /DiRa04/

Mit Hilfe der Taylor-Geraden in Bild 7.5 kann die Anzahl der Werkstücke $\omega_{\text{prgn}}(k)$, die noch bis zum erforderlichen Werkzeugwechsel produziert werden können, unter verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten v_c prognostiziert werden. Hier stellt die Taylor-Gerade nicht die physikalische Zerstörung des Werkzeugs dar, sondern das Erreichen der maximalen Verschleißmarkenbreite VB_{\max} . Wobei VB_{\max} einer vorgegebenen Anforderung entspricht.

derung an die Bearbeitungsqualität entspricht. Im regulären Betriebsmodus wird das k -te Werkstück einer bestimmten Schnittkraft zugewiesen, die der Kennlinie der Schnittgeschwindigkeit v_{c1} entspricht und zur nominalen Anzahl produzierbarer Werkstücke ω_{nom} führt.

Wenn nach k produzierten Werkstücken die Prognose $\omega_{prgn}(k)$ ergibt, dass die zu produzierende Werkstückanzahl ω_{nom} auf Grund eines irregulären Freiflächenverschleißes unterschritten wird, führt dies zu einem $\omega_2(k)$ mit $\omega_{nom} > k + \omega_{prgn}(k) = \omega_2(k)$. In diesem Fall wird das Defizit an Werkstücken $\omega_{nom} - \omega_2(k)$ zu ω_{nom} hinzuaddiert, was zur Hilfsgröße $\omega_{aux}(k) = 2 \cdot \omega_{nom} - \omega_2(k)$ führt. Die Hilfsgröße $\omega_{aux}(k)$ legt eine niedrigere Schnittgeschwindigkeit v_{c3} fest, welche einerseits die Dauer eines Werkstück-Zyklus $\vartheta_{j,k}$ der restlichen Werkstücke $\omega_{nom} - k$ erhöht, andererseits die Zuverlässigkeit des Werkzeugs steigert. Das Defizit an Werkstücken $\omega_{nom} - \omega_2(k)$ und die Größe $\omega_{aux}(k)$ müssen nach jedem gefertigten Werkstück neu berechnet werden. Die Lastminderung muss entsprechend den Ergebnissen angepasst werden.

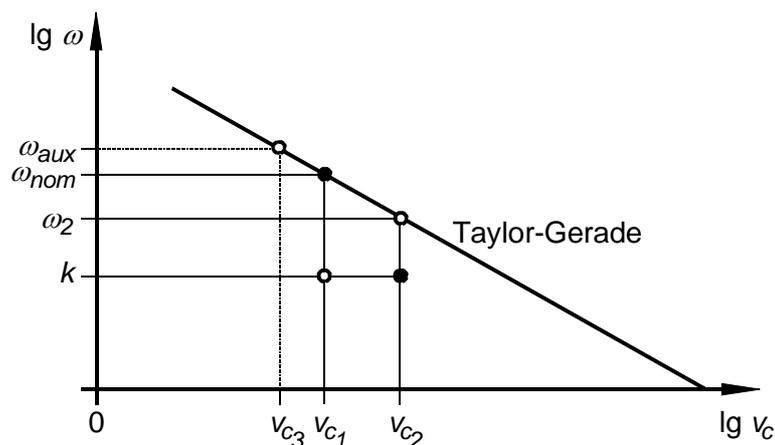


Bild 7.5 Taylor-Gerade in einem doppelt logarithmischen ω - v_c -Graph /DiRa05/

Die Schnittgeschwindigkeit v_c ist durch

$$v_c = \frac{k \cdot l_\beta \cdot D \cdot \pi}{\eta_j \cdot f_s} \quad (7.2)$$

gegeben, wobei der Weg durch die Anzahl der produzierten Werkstücke k , der Bohrtiefe l_β und dem Umfang $D \cdot \pi$ bezogen auf den Vorschub f_s dargestellt wird. Die Zeit wird durch die effektive Dauer η_j repräsentiert.

Die Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit ist nicht nur durch physikalische Grenzen eingeschränkt, sondern auch durch die vorgegebene maximale Dauer des Werkzeug-Zyklus $\eta_{max}(j)$, die den Zeitpunkt festlegt, bis zu dem die Harmonisierung der Stationen

nicht verletzt wird. Eine Prognose, ob die Bedingung $\eta_j \leq \eta_{\max}(j)$ erfüllt wird, ist mit Gleichung (7.2) durch

$$\eta_j = \left(\frac{k}{v_{c1}} + \frac{\omega_{nom} - k}{v_{c3}} \right) \cdot \frac{l_\beta \cdot D \cdot \pi}{f_s} \leq \eta_{\max}(j) \quad (7.3)$$

gegeben. Die Summanden in der Klammer beschreiben folgende Aussage: Wird nach k Werkstücken, die mit der Schnittgeschwindigkeit v_{c1} produziert worden sind, festgestellt, dass die produzierende Werkstückanzahl ω_{nom} nicht erreicht werden kann, wird die Belastung auf das Werkzeug nach einem Regeleingriff durch die reduzierte Schnittgeschwindigkeit $v_{c3} < v_{c1}$ vermindert. Alle noch zu produzierenden $\omega_{nom} - k$ Werkstücke werden dann mit v_{c3} gefertigt. Die Dauer des Werkzeug-Zyklus erreicht nach mehrfachen Regeleingriffen

$$\eta_j = \left(\frac{k}{v_{c1}} + \sum_{\rho=1}^{\omega_{nom}-k} \frac{k + \rho}{v_{c3,\rho}} \right) \cdot \frac{l_\beta \cdot D \cdot \pi}{f_s} \leq \eta_{\max}(j) \quad (7.4)$$

7.2.2 System-Prozess-Strategie

Bei der *System-Prozess-Strategie* werden beide Werte ω_{nom} und $\eta_{\max}(j)$ durch die Anzahl der Stationen beeinflusst. Die Harmonisierung der verschiedenen Dauern der Werkstück-Zyklen (Taktzeiten) an den verschiedenen Stationen wird durch die jeweilige *TTF*, die *Zeit zur Wiederherstellung des Werkzeugs* beziehungsweise die *Dauer der Instandhaltungstätigkeit*, die Anzahl der Instandhaltungsteams, nicht-deterministische Ausfälle und die darauf folgende Re-Koordination der Instandhaltungsstrategie beeinflusst. Ausfälle können durch geometrische Abweichungen der rohen Werkstücke genauso wie durch schwankende chemische und physikalische Eigenschaften des Werkstück- und Werkzeugmaterials verursacht sein. Ausfallarten wie Ausbrüche oder Werkzeugbruch, die eine sofortige Instandhaltung erfordern, werden als *nicht-deterministisch* betrachtet.

Das System ist als ausgefallen definiert, wenn zumindest an einer Station ein Werkzeugwechsel durchgeführt wird. Wenn ein Werkzeugwechsel an der i -ten Station nach dem j -ten Werkzeugzyklus und ω produzierten Werkstücken erfolgt, entspricht die System-Stillstandzeit (down time /IEC 60050/) DT_j der Zeit zur Wiederherstellung $TTR_{i,j}$ des Werkzeugs an der i -ten Station. Es gilt

$$DT_j = TTR_{i,j} = \tau_{i,j+1,0} - \tau_{i,j,\omega} , \quad (7.5)$$

siehe Bild (7.2. Im Fall eines gemeinsamen Werkzeugwechsels an mehreren Stationen hängt die System-Verfügbarkeit von den Strategien und Aufgaben der Instandhaltung ab.

Werden die Werkzeuge aller n Stationen einer TL nach dem j -ten Werkzeug-Zyklus wiederhergestellt, beginnt die System-Stillstandzeit mit dem frühesten Anfang der Wiederherstellung (min-Term) und schließt mit der spätesten Wiederherstellung eines der Werkzeuge ab (max-Term). Es folgt

$$DT_j = \max[\tau_{1,j+1,0}, \tau_{2,j+1,0}, \dots, \tau_{n,j+1,0}] - \min[\tau_{1,j,\omega}, \tau_{2,j,\omega}, \dots, \tau_{n,j,\omega}] \quad (7.6)$$

Ausfallzeiten an Stationen bezogen auf den Werkzeugwechsel können zur weiteren Betrachtung durch geeignete Verteilungsfunktionen modelliert werden; in den meisten Fällen führt die logarithmische Normalverteilung zu plausiblen Ergebnissen. Zur Vereinfachung wird angenommen

$$DT_j = TTR_{sysdel} + \sum_{i=1}^n TTR_{i,j} . \quad (7.7)$$

Hierbei wird vorausgesetzt, dass das Instandhaltungspersonal alle Stationen nacheinander wiederherstellt. Die Größe TTR_{sysdel} bezeichnet die spezifische Wartezeit des Systems, welche auf die *technische Verzugsdauer* nach IEC 60050-191-08-12 /IEC 60050/ zurückgeführt werden kann und unabhängig von der Anzahl der Stationen bezogen auf die Instandhaltung ist. Die *logistische Verzugsdauer* nach IEC 60050-191-08-12 /IEC 60050/ ist ausdrücklich in diesem Modell ausgeschlossen. Bei gleichzeitiger Wiederherstellung der Werkzeuge an n beteiligten Stationen mit $TTR_j \equiv TTR_{1,j} = TTR_{2,j} = \dots = TTR_{n,j}$ gilt

$$DT_j = TTR_{sysdel} + n \cdot TTR_j . \quad (7.8)$$

Die stationäre Verfügbarkeit A_m ist in diesem Ansatz auf die Anzahl der Werkzeug-Zyklen m_w bezogen und definiert als

$$A_m = \frac{\sum_{j=1}^{m_w} \tau_j}{\sum_{j=1}^{m_w} (\tau_j + DT_j)} . \quad (7.9)$$

Für die stationäre Verfügbarkeit über den gesamten Zeitverlauf nach m Werkzeug-Zyklen gilt

$$A_m(t) = \frac{t - \sum_{j=1}^{m_w} DT_j}{t} \quad (7.10)$$

7.2.3 Diskussion verschiedener Kombinationen

Das *Werkzeugwechselmanagement* legt eine maximale voraussichtliche Dauer $\eta_{\max}(j)$ des j -ten Werkzeug-Zyklus einer jeden Station mit $\eta_{\min} < \eta_{\max}(j)$ fest, bis zu der die Harmonisierung der Stationen nicht verletzt wird. Für jeden Werkzeug-Zyklus j wird der Wert $\eta_{\max}(j)$ durch das *Werkzeugwechselmanagement* neu berechnet. Die maximal voreingestellte Dauer des j -ten Werkzeug-Zyklus $\eta_{\max}(j)$, bis zu dem die Harmonisierung nicht verletzt ist, wird von dem Werkzeugwechselmanagement vorgegeben /DiRa05/.

Bei der Erörterung der System-Prozess-Strategie wird eine Transferlinie mit $n = 4$ Stationen, einer nominalen Anzahl zu produzierender Werkstücke $\omega_{\text{nom},1} = 40$, $\omega_{\text{nom},1} = 80$, $\omega_{\text{nom},1} = 120$, $\omega_{\text{nom},1} = 160$ (frei gewählte harmonisierte Größen); zwei Instandhaltungsteams und harmonisierter regulärer $TTF_{i,j}$ betrachtet.

Zum effizienten Betrieb einer TL werden in der Praxis die Werkzeugwechsel der einzelnen Stationen so harmonisiert, dass an möglichst vielen Stationen gleichzeitig die Werkzeuge wiederhergestellt werden können. Daher werden in der Modellierung die $TTF_{i,j}$ fortlaufend geordnet und ein 1-2-3-4-Typ der Harmonisierung mit

$$TTF_{1,j} = \frac{TTF_{2,j}}{2} = \frac{TTF_{3,j}}{3} = \frac{TTF_{4,j}}{4} \quad (7.11)$$

ausgewählt. Angemerkt sei, dass auch in der Anwendung die Nenner ein ganzzahliges Vielfaches des kleinsten $TTF_{i,j}$ Wertes sein müssen.

Die Zeiten zur Wiederherstellung eines jeden Werkzeugs in jeder Station werden als konstant angenommen, dabei haben empirisch gewonnene Daten das Verhältnis

$$TTR = \frac{TTR_{1,j}}{8} = \dots = \frac{TTR_{4,j}}{32} \quad (7.12)$$

ergeben.

Beispiel 1 – Lange Instandhaltungszeiten kombiniert mit der Ausfallart Kategorie c

Das erste Modell betrachtet Bedingungen, unter denen *Reliability-Adaptive-Controlled* (RAC) Transferlinien sehr effektiv sind: Lange Instandhaltungszeiten an allen Stationen *und* ein ausgefallener Bohrer von sehr schlechter Qualität aus Kategorie c.

Die Instandhaltungszeiten $TTR_i = 10 \text{ min}$ ($i = 1, \dots, 4$) stehen im Verhältnis zur regulären TTF_i mit $TTR_i/TTF_i = 1/4$ und $\eta_{\min,i} = \omega_{\text{nom},i} \cdot \mathcal{G}_{j,k}$; $\mathcal{G}_{j,k} = 1 \text{ min}$ pro Werkstück.

Im regulären Betriebsmodus, wenn z. B. alle Bohrer der Kategorie a entsprechen, kann die Stillstandzeit DT durch

$$DT(t) = TTR_j \cdot (16 \cdot \text{int}[t/640 \text{ min}] + \beta + \text{int}[(\alpha - \beta \cdot 10 \text{ min})/50 \text{ min}]) \quad (7.13)$$

mit $t > 0$ und

$$\begin{aligned} \alpha &= 640 \text{ min} \cdot \text{frac}[t/640 \text{ min}], \\ \beta &= \text{int}[(\alpha + 10 \text{ min})/220 \text{ min}] + \text{int}[\alpha/320 \text{ min}] \end{aligned} \quad (7.14)$$

kalkuliert werden. In einem Beobachtungszeitraum von z. B. $\tau_m = 2470 \text{ min}$ ergibt die Stillstandzeit $DT(\tau_m) = 610 \text{ min}$. Die Verfügbarkeit A_m mit

$$A_m(t) = \frac{t - \sum_{j=1}^m DT_j}{t} \quad (7.15)$$

resultiert zu $A_m(\tau_m) \approx 75.3 \%$. – Als nächstes wird ein Bohrer der Kategorie c mit $\omega_{c,1} = \omega_{\text{nom},i} \cdot 30/40$ (sehr schlechte Qualität) in Station 1 im ersten Werkzeug-Zyklus betrachtet; alle Bohrer in den anderen Stationen sind in jedem Werkzeug-Zyklus aus Kategorie a . Der erste vorzeitige Werkzeugwechsel verletzt die Harmonisierung der gesamten Transferlinie. Infolgedessen stimmt der zweite Werkzeugwechsel in Station 1 nicht mit dem Ende des ersten Werkzeug-Zyklus in Station 2 überein. Danach nimmt die Disharmonie zu. In diesem Fall folgt für eine *non-reliability-adaptive-controlled* (Non-RAC) Transferlinie eine Stillstandzeit DT von

$$DT(t) = TTR_j \cdot \left(19 \cdot \text{int}[t/670 \text{ min}] + \text{int}[\alpha/110 \text{ min}] + \text{int}[(\alpha + 60 \text{ min})/110 \text{ min}] + \text{int}[(\alpha + 20 \text{ min})/110 \text{ min}] \right) \quad (7.16)$$

mit $\alpha = 670 \text{ min} \cdot \text{frac}[t/670 \text{ min}]$, $t > 0$.

In dem gleichen Beobachtungszeitraum wie oben ergibt die Stillstandzeit $DT(\tau_m) = 690 \text{ min}$. Die Verfügbarkeit A_m sinkt auf $A_m(\tau_m) \approx 72.1 \%$.

Der analytische Ansatz zeigt bereits, dass die momentane Verfügbarkeit einer RAC-Transferlinie in einem gegebenen Zeitintervall der *stationären Verfügbarkeit* oder für eine gegen unendlich gehende Dauer der *asymptotischen Verfügbarkeit* entgegenstrebt IEC 60050-191-06 und 05 /IEC 60050/. Die Berechnung der asymptotischen mittleren Verfügbarkeit für eine gegen unendlich gehende Dauer kann nach IEC 60050-191-11-09 /IEC 60050/ durch

$$\bar{A} = \lim_{t_2 \rightarrow \infty} \bar{A}(t_1, t_2) \quad (7.17)$$

ausgedrückt werden. Bild 7.6 zeigt die asymptotische mittlere Verfügbarkeit des regulären Betriebsmodus im Vergleich zum Non-RAC-Betriebsmodus über einen Betrachtungszeitraum von 10.000 Minuten (etwa eine Woche Dauerbetrieb).

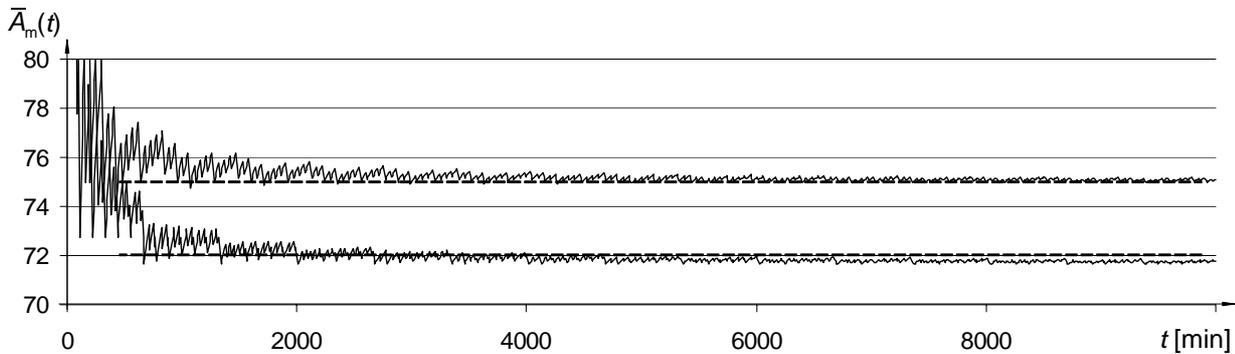


Bild 7.6 Vergleich der asymptotischen mittleren Verfügbarkeit des regulären Betriebsmodus mit 75,3% und des Non-RAC-Betriebsmodus mit 72,1 %

Unter den gleichen Bedingungen wie oben beschrieben kann die Stillstandzeit einer RAC Transferlinie durch die Funktion

$$DT(t) = TTR_j \cdot (16 \cdot \text{int}[t/640 \text{ min}] + \beta + \text{int}[(\alpha - \beta \cdot 10 \text{ min})/50 \text{ min}] + 10 \text{ min}) \quad (7.18)$$

mit α , β wie im regulären Betriebsmodus berechnet werden. Verglichen mit der Non-RAC Transferlinie steigt die Verfügbarkeit unter den gleichen Bedingungen zu $A(\tau_m) \approx 74,9 \%$ mit $\alpha = 550 \text{ min}$, $\beta = 3$ und $DT(\tau_m) = 620 \text{ min}$. Im Vergleich zu einer Non-RAC Transferlinie steigt die Verfügbarkeit unter denselben Bedingungen auf einen Wert von $A(\tau_m) \approx 74,9 \%$ mit $\alpha = 550 \text{ Minuten}$, $\beta = 3$, und $DT(\tau_m) = 620 \text{ Minuten}$. Tabelle 7.1 fasst die Auswirkungen und Verfügbarkeiten zusammen und zeigt die hohe Effektivität des RAC-Ansatzes unter den genannten Bedingungen.

Tabelle 7.1 Bewertung der Verfügbarkeit des Beispiels 1

Betriebsmodus	Verfügbarkeit [%]	Ausfallart
unbestimmt	75,3	kein Ausfall, regulärer Modus
Reliability-Adaptive	74,9	Bohrer der Kategorie c bei $i, j = 1$
Non-Reliability-Adaptive	72,1	Bohrer der Kategorie c bei $i, j = 1$

Beispiel 2 – Mittellange Instandhaltungszeiten kombiniert mit der Ausfallart Kategorie *b*

Dieses Modell betrachtet Bedingungen unter denen der RAC Ansatz auf den ersten Blick nicht effektiv sein könnte. Dabei sind die zu Grunde gelegten Instandhaltungszeiten von $TTR_i = 5 \text{ min}$ ($i = 1, \dots, 4$) im Verhältnis zur regulären TTF_i mit $TTR_i/TTF_i = 1/8$ mittellange Zeitspannen. Ein Bohrer der Kategorie *b* mit moderater Werkstückanzahl $\omega_{b,1} = \omega_{\text{nom},1} \cdot 38/40$ tritt in Station 1 im ersten Werkzeug-Zyklus auf (keine weiteren Werkzeugausfälle in einer anderen Station oder Werkzeug-Zyklus). Für $\eta_{\min,i}$ und $\vartheta_{j,k}$ werden wie beim Modell in Kontext 1 die gleichen Werte eingesetzt.

Die Bewertung der Verfügbarkeit (siehe Tabelle 7.2) zeigt, dass in einem Beobachtungszeitraum von 502 min (annähernd eine Schicht) eine RAC-Transferlinie sehr viel effektiver ist als eine Non-RAC.

Tabelle 7.2 Bewertung der Verfügbarkeit des Beispiels 2

Betriebsmodus	Verfügbarkeit [%]	Ausfallart
unbestimmt	87,1	kein Ausfall, regulärer Modus
Reliability-Adaptive	86,7	Bohrer der Kategorie <i>c</i> , bei $i,j = 1$
Non-Reliability-Adaptive	83,1	Bohrer der Kategorie <i>c</i> , bei $i,j = 1$

Beispiel 3 – Mittellange Instandhaltungszeiten kombiniert mit dem Auftreten mehrerer Ausfälle

In diesem Kontext sind die Bedingungen bezüglich TTR_i , $\eta_{\min,i}$ und $\vartheta_{j,k}$ äquivalent zu den Bedingungen in Kontext 2. Die Parameter

$$\begin{aligned}
 \omega_{b,1} &= \omega_{\text{nom},1} \cdot 38/40, & \omega_{c,1} &= \omega_{\text{nom},1} \cdot 34/40; \\
 \omega_{b,2} &= \omega_{\text{nom},2} \cdot 76/80, & \omega_{c,2} &= \omega_{\text{nom},2} \cdot 68/80; \\
 \omega_{b,3} &= \omega_{\text{nom},3} \cdot 114/120, & \omega_{c,3} &= \omega_{\text{nom},3} \cdot 102/120; \\
 \omega_{b,4} &= \omega_{\text{nom},4} \cdot 152/160, & \omega_{c,4} &= \omega_{\text{nom},4} \cdot 136/160;
 \end{aligned}$$

beschreiben das Verhalten der schlechten und sehr schlechten Bohrer. Insgesamt sind vier schlechte und ein sehr schlechter Bohrer während des Beobachtungszeitraums von

$\tau_m = 502$ min aufgetreten; mit (i,j) sind Bohrer der Kategorie b bei $(1,1)$, $(1,4)$, $(1,6)$, $(2,1)$ und ein Bohrer der Kategorie c bei $(1,2)$.

In Tabelle 7.3 werden die Verfügbarkeitsbewertungen einer Non-RAC-Transferlinie mit zwei RAC-Transferlinien verschiedener Instandhaltungsstrategien verglichen: zum einen eine Transferlinie mit einem Instandhaltungsteam und zum anderen eine Transferlinie mit zwei Instandhaltungsteams.

An der Non-RAC-Transferlinie ist nur ein Instandhaltungsteam im Einsatz, da Instandhaltungen an nicht mehr als einer Station gleichzeitig durchgeführt werden. Infolgedessen ist die Harmonisierung der Werkzeugwechsel an der Transferlinie verletzt, siehe Abschnitt 5.4. Die Ergebnisse zeigen wieder die Effektivität des Ansatzes.

Tabelle 7.3 Bewertung der Verfügbarkeit des Beispiels 3

Betriebsmodus	Verfügbarkeit [%]	Instandhaltungsstrategie
unbestimmt (kein Ausfall)	87,1	2 Teams
Reliability-Adaptive	84,7	2 Teams
unbestimmt (kein Ausfall)	80,1	1 Team
Non-Reliability-Adaptive	80,1	1, 2, 3, oder 4 Team(s)
Reliability-Adaptive	79,7	1 Team

7.2.4 Erläuterung zur Harmonisierung der Werkzeugwechsel-Strategie

Im Allgemeinen beeinflusst die Anzahl der gleichzeitig arbeitenden Instandhaltungsteams die Ausbringung einer Transferlinie deutlich. Wenn nur ein Team eingesetzt ist, wird die Harmonisierung einer konventionellen Non-RAC-Transferlinie überflüssig, da die Werkzeugwechsel nacheinander durchgeführt werden, wobei sich die Zeiten der Wiederherstellung aufsummieren und die Ausbringung herabgesetzt wird. In der Praxis sind zumindest zwei Teams erforderlich, um Werkzeugwechsel an verschiedenen Stationen gleichzeitig durchzuführen.

Wenn eine konventionelle Transferlinie mit einer RAC-Transferlinie verglichen wird, dann wird der oben beschriebene Effekt die Effektivität sogar noch mehr reduzieren. Beim Einsatz nur eines Instandhaltungsteams ist eine RAC-Transferlinie weniger effektiv als eine Non-RAC-Transferlinie, da die Erhöhung der Dauer eines Werkstück-Zyklus $\mathcal{G}_{j,k}$ bei Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit v_c nicht mehr kompensiert werden kann

und sich zur Summe der aufeinander folgenden Wiederherstellungszeiten hinzuaddiert. Bild 7.7 zeigt einen Graph der Ausbringung der verschiedenen Konzepte.

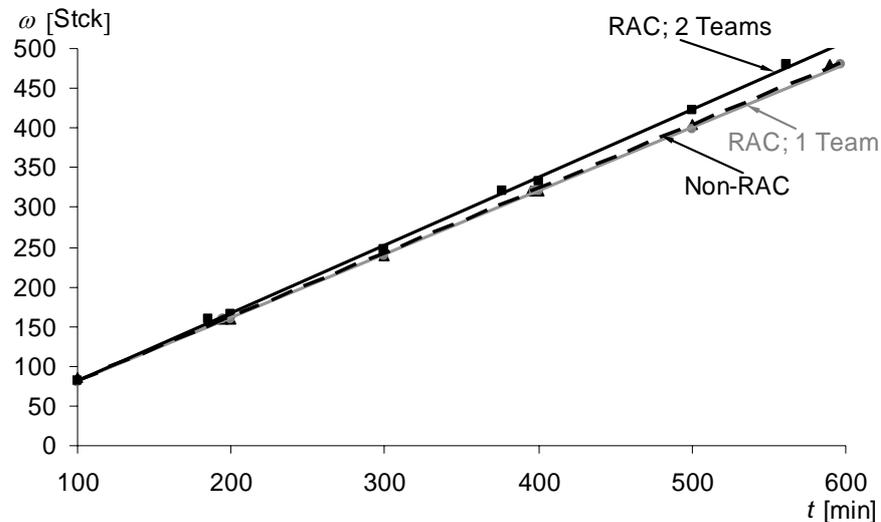


Bild 7.7 Grafik der Ausbringung einer RAC-Transferlinie mit einem und zwei Instandhaltungsteam(s) verglichen mit einer Non-RAC-Transferlinie (siehe Beispiel 3) /DiRa05/

Vom Standpunkt des Systems betrachtet werden die nominal zu produzierenden Werkstücke ω_{nom} und die maximale vorgegebene Dauer des j -ten Werkzeug-Zyklus, bis zu der die Harmonisierung der Stationen nicht verletzt wird, durch

- die Anzahl der Stationen,
- die Harmonisierung der verschiedenen Taktzeiten, die auf Basis der entsprechenden TTF festgelegt sind,
- Zeit zur Wiederherstellung des Werkzeugs oder Dauer der Instandhaltungstätigkeiten,
- Anzahl der Instandhaltungsteams,
- nicht-deterministische Ausfälle und
- die darauf folgende Re-Koordination der Instandhaltungsstrategie

beeinflusst.

Nicht-deterministische Ausfälle können durch geometrische Abweichungen der rohen Werkstücke genauso wie durch schwankende chemische und physikalische Eigenschaften des Werkstück- und Werkzeugmaterials verursacht sein. Ausfallarten wie Ausbrüche oder Werkzeugbruch, die eine sofortige Instandhaltung -in diesem Fall einen unverzüglichen Werkzeugwechsel- erfordern, werden als *nicht-deterministisch* betrachtet.

Außerdem kann der Ansatz des zuverlässigkeits-adaptiven Werkzeugwechsel Managements auf andere Anwendungsbereiche, in denen Verschleiß auftritt, wie z. B. Lager, Getriebe und sogar Hochpräzisionsschmiermittel übertragen werden.

Die signifikante Effektivität des zuverlässigkeits-adaptiven Werkzeugwechsel Managements, die sich insbesondere in Tabelle 7.3 und Bild 7.7 widerspiegelt, wird im folgenden Kapitel in einer Simulation fundiert. Es wird eine Vier-Stationen-Transferlinie mit verschiedenen *TTFs* der Werkzeuge und einer festgelegten Gesamtbetriebszeit von 9000 Minuten unter Berücksichtigung verschiedener Regelungseinstellungen simuliert. Grundlage in der Simulation sind die in diesem Kapitel diskutierten empirisch gewonnenen *TTFs* der Hartmetall-Spiralbohrer. Es zeigt sich dabei, dass, je enger die Intervallgrenzen an v_C gesetzt sind, umso größer die Wirkung der Werkzeugverschleißregelung ist.

8 Validierung des deterministischen Ansatzes durch Simulation des Produktionsprozesses

Aus der Sicht des übergeordneten Systems wird ein vorgegebener Produktionsprozess gewöhnlich mit dem Ziel analysiert, die Auslastungsmöglichkeiten der Produktionsanlage zu schätzen und Reserven zur Erhöhung der Effektivität und Rentabilität aufzudecken. Die Betrachtungsergebnisse werden zur Optimierung der Arbeitsorganisation und zur Schätzungen über die Zweckmäßigkeit und über die Effektivität eventuell neu zu verwendender Technologien ausgewertet /Bul71/.

Bild 8.1 zeigt Varianten zur Analyse des Verhaltens einer Anlage unter bestimmten veränderten Bedingungen, wobei das Modell die zu untersuchenden Eigenschaften möglichst exakt wiedergeben muss. Aus Sicherheits- und Kostengründen wird selten an der Anlage selbst überprüft, da es je nach Wahl der zu untersuchenden Parameter bis hin zur Zerstörung kommen kann.

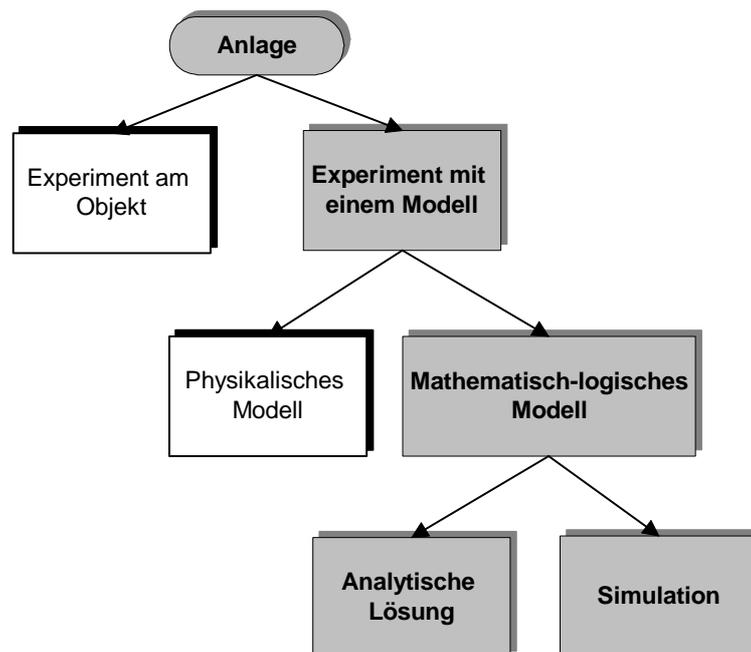


Bild 8.1 Systembetrachtung /LaKe00/

Bei den Modellen wird zwischen physikalischen Modellen als materielle Nachbildung der Realität und mathematisch-logischen Modellen unterschieden. Die mathematisch-logischen Modelle gliedern sich zum einen in Modelle mit analytischen Lösungen, wie sie im vorangegangenen Kapitel anhand der verschiedenen vorgestellten Beispiele dargestellt sind und in Simulationsmodelle. Bei der Erstellung von Varianten besitzen die mathematisch-logischen Modelle den Vorteil, dass sie an Computern erstellt werden

und Änderungen relativ schnell durchzuführen sind. Die hohe Rechenleistung moderner Prozessoren lässt eine immer detailliertere Nachbildung des Systems zu, wobei der reale Zeitablauf von mehreren Stunden oder Tagen verkürzt nachvollzogen werden kann.

Die Forderung der Industrie nach Produktionsanlagen mit immer höheren Leistungskennwerten hat zur Folge, dass Anlagen mit umfassenderen Funktionen konstruiert werden. Das steigende Maß an Komplexität führt zu einer wachsenden Zahl an Systemgrößen, Wechselwirkungen und stochastischen Einflüssen, die zusätzlich zur vorgestellten analytischen Beschreibungen des Systemverhaltens eine Simulation sinnvoll macht.

Nach VDI 3633 wird Simulation definiert als: „Nachbildung eines dynamischen Prozesses in einem Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“ /VDI 3633/.

Tempelmeier /TeKu92/ beschreibt die Nutzung von Simulationstechniken für Flexible-Fertigungssysteme und Gershwin /Ger94/ explizit für Transferlinien. Simulation wird als Abbildung eines realen Problems (Anlage) durch ein formales Modell definiert. Dabei wird das im Allgemeinen dynamische Modellverhalten bei experimenteller Veränderung von exogenen, den Modellablauf beeinflussenden Parametern beobachtet. Simulationen sind durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

- Sie ermöglichen die Anwendung quantitativer Modellen.
- Es werden Berechnungsexperimente anhand der Modelle mit Hilfe numerischer Techniken durchgeführt, wobei durch das Simulationsmodell keine Entscheidungsalternativen im Sinne einer mathematischen Optimierung getroffen, sondern vom Anwender vorgegebene Alternativen bewertet werden.
- Sie weisen eine spezielle Problembezogenheit auf.

Die Simulation wird vorzugsweise zur Beurteilung einer Anlage hinsichtlich vorgegebener Zielsetzungen mit ausreichendem Detaillierungsgrad eingesetzt, wenn analytische Methoden nicht anwendbar sind.

8.1 Experimentplanung

Das Modell einer vier Stationen Transferlinie (wie in Bild 5.5 schematisch dargestellt) ist nach genauen Vorgaben umgesetzt und von Wolters /Wol01/ in seiner Diplomarbeit simuliert worden (s. Bild 8.3). Für die Durchführung der Untersuchung wurden die Pa-

parameter k_T und C_T der *Taylor-Geraden* aus den Ergebnissen der Auswertung der empirischen Daten aus Kapitel 6 übernommen und die Regressionsgerade über die Daten von v_{60} und v_{75} berücksichtigt. Entsprechend Gleichung 3.6 ergibt dies für die Simulation folgende Taylor-Gerade

$$\log(T) = -3,0147192 \cdot \log(v_c) + \log(7,30114315) \quad (8.1)$$

8.1.1 Schnittparameter in der Simulation

Die Schnittparameter für die einzelnen Arbeitsstationen wurden, wie in Tabelle 8.1 angegeben, gewählt.

Tabelle 8.1 In der Simulation verwendete Schnittparameter

	Einheit	Station 1	Station 2	Station 3	Station 4
D	mm	12,8	10,0	8,6	8,0
l_f	mm	20 · 30	28 · 25	24 · 28	2 · 280
f_s	mm	0,3	0,3	0,3	0,3
n_{rot}	min ⁻¹	2500	2500	2500	2500
v_f	mm/min	750	750	750	750
t_c	min	0,8	0,933	0,896	0,747
v_c	m/min	100,53	78,54	67,54	62,83
ω_{cal}	Stück	22	41	68	101
ω_{nom}	Stück	20	40	60	100
$M_{c,max}$ bei VB_{max}	Nm	13,51	13,10	13,01	13,06

Die Parameter für den Werkzeugdurchmesser D , den Vorschubweg l_f , den Vorschub f_s und die Werkzeugdrehzahl n_{rot} wurden vorgegeben (siehe Tabelle 8.1), wobei die Arbeitsstationen ein bis drei Bohrstationen darstellen, die jeweils eine bestimmte Anzahl β an Bohrungen von je l_β Bohrtiefe bearbeiten. Der gesamte Vorschubweg beträgt $l_f = \beta \cdot l_\beta$. Die Station 4 stellt eine Stirnfrässtation dar. Sie bearbeitet die Oberfläche des Werkstücks zweimal auf einer Länge von je 280 mm. Für die Parameter des zweiten Block der Tabelle 8.1 gilt

$$v_f = f_s \cdot n_{rot} \quad , \quad t_c = \frac{l_\beta}{v_f} \quad , \quad v_c = \frac{\pi \cdot n_{rot} \cdot D}{1000} \quad (8.2)$$

Die Standmengen ω_{cal} der Werkzeugwechsel-Strategie wurden derart gewählt, dass die maximal erreichbare Anzahl an Werkstücken der nominalen Werkstückanzahl ω_{nom} wei-

testgehend entspricht. Gleichzeitig muss jedoch eine Werkzeugwechsel-Strategie entstehen, bei der die Standmengen der vier Stationen ein kleinstes gemeinsames ganzzahliges Vielfaches der Standmenge der übrigen Station bilden. Für Tabelle 8.1 ergibt sich folgende Werkzeugwechsel-Strategie: Der Werkzeugwechsel erfolgt nach je

- 20 Werkstücken an Station 1
- 40 Werkstücken an Station 2
- 60 Werkstücken an Station 3
- 100 Werkstücken an Station 4.

Zur Bestimmung der Geradengleichung einer Schnittmomenten-Kennlinie zur Schnittgeschwindigkeit $v_c > v_{60}$ wird wie in Gleichung 6.8 der Dreisatz auf die Steigung $m_{c,v}$

$$\frac{m_{c,60} - m_{c,v}}{m_{c,75} - m_{c,60}} = \frac{v_c - v_{60}}{v_{75} - v_{60}} \quad (8.3)$$

und dem Schnittpunkt mit der Ordinatenachse $M_{c,v}(0)$

$$\frac{M_{c,v}(0) - M_{c,60}(0)}{M_{c,75}(0) - M_{c,60}(0)} = \frac{v_c - v_{60}}{v_{75} - v_{60}} \quad (8.4)$$

angewandt. Der Vorzeichenwechsel bei $m_{c,v}$ in Gleichung (8.3) ist darauf zurückzuführen, dass mit Zunahme der Schnittgeschwindigkeit die Steigung der Schnittmomenten-Kennlinie abnimmt (siehe Bild 6.9). Für die Geradengleichung

$$M_{c,v}(\beta) = m_{c,v} \cdot \beta + M_{c,v}(0) \quad (8.5)$$

ergibt sich

$$M_{c,v}(\beta) = \left(m_{c,60} - \frac{v_c - v_{60}}{v_{75} - v_{60}} \cdot (m_{c,75} - m_{c,60}) \right) \cdot \beta + \frac{v_c - v_{60}}{v_{75} - v_{60}} \cdot (M_{c,75}(0) - M_{c,60}(0)) + M_{c,60}(0). \quad (8.6)$$

Die Abweichung des Schnittmoments von seinem Sollwert während des Betriebs (siehe Bild 6.4) wird durch eine Normalverteilung beschrieben, um die Modellierung zu vereinfachen. Der Sollwert entspricht dabei dem Erwartungswert $E(M_{c,v}(\beta))$. In Bild 8.2 ist die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Schnittmoments dargestellt. Liegt das Schnittmoment unterhalb des Soll- bzw. Erwartungswertes, wird die nominale Werkstückanzahl mindestens erreicht oder übertroffen. Daher wird im Weiteren nur der Teil der Verteilungsdichtefunktion berücksichtigt, der oberhalb des Erwartungswertes liegt und ein Erreichen der nominale Werkstückanzahl in Frage stellt.

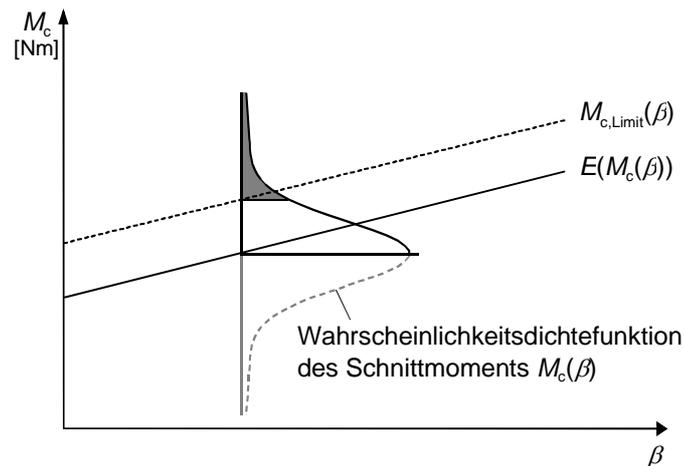


Bild 8.2 Erwartungswert und zulässiger Wert des Schnittmoments sowie die zugehörige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

Es wird ein zulässiger Wert des oberen Schnittmoments $M_{c,Lim}$ festgelegt, ab dem eine Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit und somit eine Regelung erfolgt. Für $M_{c,Lim}$ gilt:

$$M_{c,Lim}(\beta) = z \cdot \sigma + E(M_{c,v}(\beta)) \quad (8.7)$$

Das Produkt $z \cdot \sigma$ beschreibt die maximal tolerierte Abweichung des Schnittmoments von seinem Erwartungswert $E(M_{c,v}(\beta))$ als reelles Vielfaches der Standardabweichung σ . Die in Bild 8.2 grau dargestellte Fläche unterhalb des Graphen der Dichtefunktion repräsentiert daher die *Wahrscheinlichkeit für den Einsatz der Regelung* und wird verkürzend als *Regelwahrscheinlichkeit* bezeichnet.

Die Empfindlichkeit der Regelung bei vorzeitigem Verschleiß ist in der Simulation als *Wahrscheinlichkeit für einen Regeleinsatz* modelliert und kann in Stufen gewählt werden. Dabei gibt eine Wahrscheinlichkeit an, wie viele Werte vom gegenwärtigen Mittelwert $E(M_c(\beta))$ abweichen und einen erhöhten Verschleiß anzeigen. Zu berücksichtigen ist, dass nur die Werte oberhalb $E(M_c(\beta))$ signifikant für einen erhöhten Verschleiß sind. Somit kann die Regelwahrscheinlichkeit als Maß bezeichnet werden, wie häufig die Simulation die Schnittgeschwindigkeit verringert, um einen übermäßigen Verschleiß zu kompensieren.

Die Ergebnisse der empirischen Schnittmoment-Standzeitversuche mit einer Schnittgeschwindigkeit von v_{75} haben eine mittlere Standardabweichung von $\bar{\sigma}_{75} = 0,4439$ Nm des Schnittmoments ergeben. Dieses wurde in der Simulation berücksichtigt, indem die Schwankungen um die Soll-Schnittgeschwindigkeit ungefähr im Bereich von $\pm 20\%$ liegen, so dass die Regelung der Schnittgeschwindigkeit zur Einhaltung des Zerspanungsprozesses in einem begrenzten Rahmen um Soll-Schnittgeschwindigkeit arbeitet.

Basierend auf die in Kapitel 5 in Tabelle 5.2 vorgestellten Dauern für Werkzeugwechsel an Transferlinien, wird in der Simulation zum einen die empirisch ermittelte logarithmische Normalverteilung $LN(7,58; 4,04)$ und zum anderen eine $LN(10; 2)$ -Verteilung, mit geringerer Streuung bei einem höhere Mittelwert, für Werkzeugwechselzeiten angewendet. Des Weiteren sind die konstanten Zeiten von 7,6 Minuten, als Mittelwert der $LN(7,58; 4,04)$ -Verteilung, und 3,5 Minuten, als Erwartungswert μ der $LN(7,58; 4,04)$ -Verteilung abzüglich der Standardabweichung σ , berücksichtigt. Diese Zeiten repräsentieren einen permanent überdurchschnittlich schnellen Werkzeugwechsel, unter der Voraussetzung, dass ausreichend Instandhaltungspersonal vor Ort ist, um alle anfallenden Werkzeugwechsel unverzüglich und gleichzeitig an unterschiedlichen Stationen durchzuführen. Die Simulationsdauer wurde mit einer Woche im Dreischichtbetrieb bei 19 Schichten je Woche festgelegt, das einem Zeitraum von 9120 Minuten entspricht. Jeweils 50 Simulationsläufe sind für jede Kombination mit Non-RAC, 2 %, 3 %, 4 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 30 % und 40 % Regelwahrscheinlichkeit und Werkzeugwechselzeiten entsprechend einer logarithmischen Normalverteilung mit den Werten $\mu = 7,58$ Minuten; $\sigma = 4,04$ Minuten sowie $\mu = 10$ Minuten; $\sigma = 2$ Minuten und konstanten Werkzeugwechselzeiten von 7,6 und 3,5 Minuten durchgeführt worden.

8.1.2 Beschreibung des Simulationsmodells

Das verwendete Simulationsprogramm *EXTEND* /Ext99/ arbeitet mit einer blockorientierten Simulationssprache auf einer grafischen Oberfläche. Es sind mehrere Bibliotheken mit verschiedenen Blöcken enthalten, die zum Beispiel Tätigkeiten darstellen, Attribute eines Objekts beeinflussen, den Durchlauf dynamischer Elemente beeinflussen oder Statistikblöcke, die den Ablauf protokollieren sowie Operationsblöcke, die den logischen Zusammenhang eines Modells darstellen. Mit diesen vorgefertigten Blöcken kann leicht ein mathematisch-logisches Simulationsmodell zusammengestellt werden.

Bei Bedarf können vollkommen neue Blöcke mit der programminternen Programmiersprache *ModL*, die auf der Programmiersprache *C* basiert, erstellt werden.

EXTEND bietet folgende Eigenschaften:

- Definieren und Ändern von Objekt-Attributen und globalen Variablen. Beide können in logischen Entscheidungsprozessen eingesetzt werden.
- Einsatz von mathematischen Ausdrücken und Funktionen.

- Erstellen und Modifizieren von existierenden Blöcken für den Einsatz in gegenwärtigen und auch zukünftigen Modellen. Dies umfasst auch das Erstellen von hierarchischen Modellen für komplexe Systeme.
- Import und Export von Daten.
- Durchführung von kombinierten diskret-kontinuierlichen Simulationen.

Bild 8.3 zeigt den strukturellen Aufbau des Simulationsmodells einer vier Stationen Transferlinie, das aus folgenden Elementen zusammengesetzt ist:

- dem Block *Parameter/Start*
- den vier Stationen
- dem Transfer (Verkettung) der Werkstücke zur jeweils nächsten Station
- dem Plotter
- dem Block *Daten Speichern*

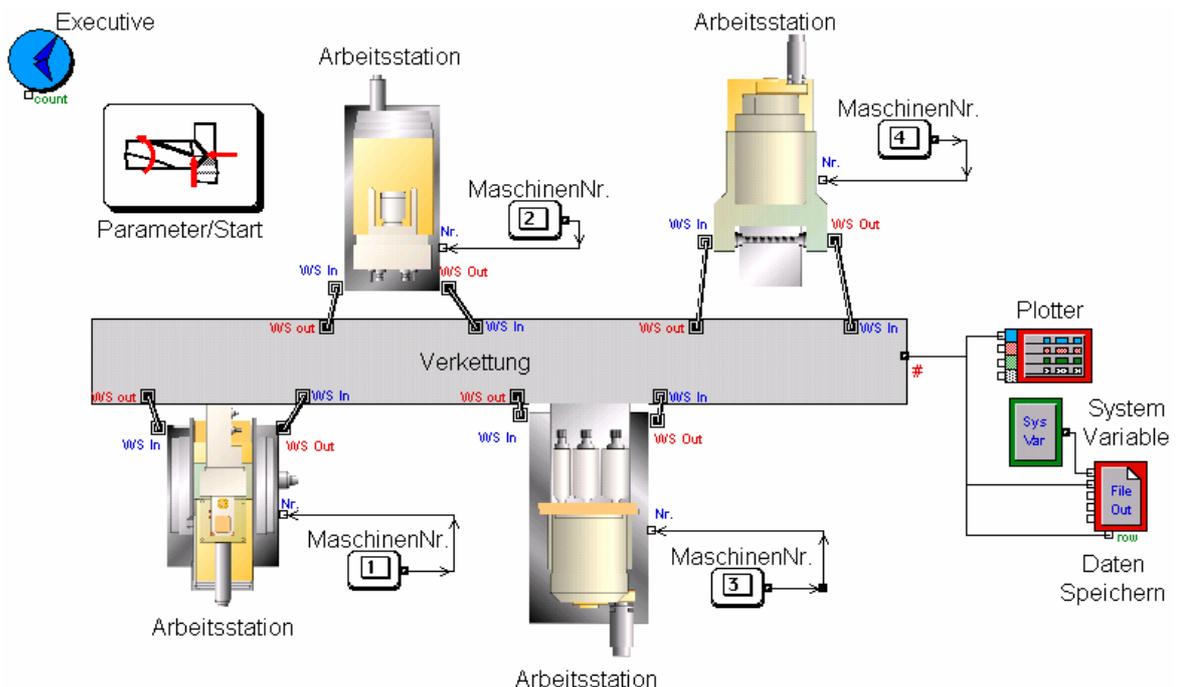


Bild 8.3 Simulationsmodell einer Transferlinie mit 4 Stationen /Wol01/

Im Folgenden werden die drei Register des Blocks *Parameter/Start*, in dem die Parameter für die Simulation eingestellt werden können, beschrieben. Bild 8.4 zeigt die Möglichkeit der Eingabe der Taylor-Geraden für das Betriebsdauerverhalten eines Werkzeugs.

[48] Parameter/Start

Simulation

Taylor-Gerade Spannungparameter Werkzeugwechsel

Eingabe der Parameter zur Berechnung der Taylor-Geraden

Steigungsexponent k der Taylorgeraden
(in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit)

k :

Achsenabschnitt der Taylor-Geraden bei $T = 1$ min

logCT: m/min

log T = - * log uc +

Cancel

Help

Bild 8.4 Gewählte Parameter der Taylor Geraden in der Simulation /Wol01/

Im Register *Spannungparameter* können für die Werkzeuge an den einzelnen Stationen die Schnittwerte, wie Werkzeugdurchmesser D , Vorschubweg l_f , Vorschub f_s und Werkzeugdrehzahl n_{rot} eingegeben werden.

[48] Parameter/Start

Simulation

Taylor-Gerade Spannungparameter Werkzeugwechsel

Eingabe der Parameter zum Spannungs Vorgang

Werkzeugdurchmesser D :

Station 1: mm Station 2: mm Station 3: mm Station 4: mm

Vorschubweg l_f :

Station 1: mm Station 2: mm Station 3: mm Station 4: mm

Vorschub f : mm

Drehzahl n : 1/min

Vorschubgeschwindigkeit v_f : mm/min

Schnittzeit je Werkstück t_c :

Station 1: min Station 2: min Station 3: min Station 4: min

Schnittgeschwindigkeit u_c :

Station 1: m/min Station 2: m/min Station 3: m/min Station 4: m/min

Cancel

Help

Bild 8.5 Eingestellte Schnittparameter in den verschiedenen Stationen in der Simulation /Wol01/

Auf Basis der theoretischen Standmengen kann im Register *Werkzeugwechsel* eine festgelegte Werkzeugwechselstrategie eingegeben werden. Für jede Station, in Bild 8.6 als Maschine bezeichnet, kann die nominale Werkstückanzahl ω_{nom} , in Bild 8.6 mit NT_{wzw} benannt, eingegeben werden.

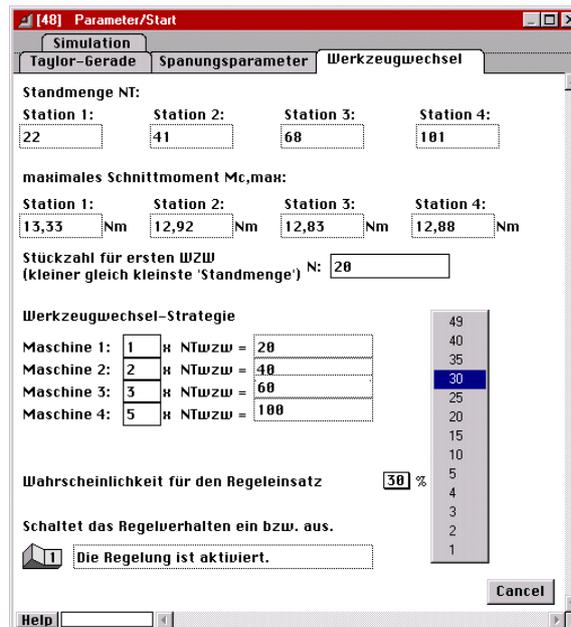


Bild 8.6 Werkzeugwechsel Sensibilität (Konfidenzgrenze) /Wo101/

8.2 Regelung des Werkzeugverschleißes zum Erhalt einer voreingestellten Werkzeugwechselstrategie

Ähnlich einer Lageregelung, bei der einem Vorschubantrieb ein Lagesollwert vorgegeben werden und dementsprechend die Vorschubbewegung erzeugt und ein vorgegebene Position angefahren wird, kann ein vorgegebenes Drehmoment $M_{c,v}(\beta)$ zu einem Zeitpunkt beziehungsweise zu einer bestimmten Bohrungsanzahl als Sollwert vorgegeben werden. Bei der Verschleißregelung, die in Bild 8.7 skizziert ist, wird eine Verschleißmarke als Sollwert mit VB_{Soll} vorgegeben und im Regler mit VB_{Ist} verglichen. In der Regelstrecke wird vom Spindelmotor das Drehmoment M_m , welches proportional zum wirkenden Drehmoment M_c , das an der Werkzeugschneide wirkt, gemessen und mit dem zulässigen $VB(t)$ verglichen. Wenn die zulässige Verschleißmarkenbreite überschritten wird, ist eine Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit, wie in den Kapitel 6 beschrieben, erforderlich. Eine Lageregelung kann durch Kaskadenregelung auch mit Modellnachführung oder als Zustandsregelung ausgelegt werden. Ein weiterführendes Regelverfahren ist die prädiktive Regelung, der aus dem Wissen über den nachfolgenden Sollwertverlauf die Stellgröße bestimmt wird.

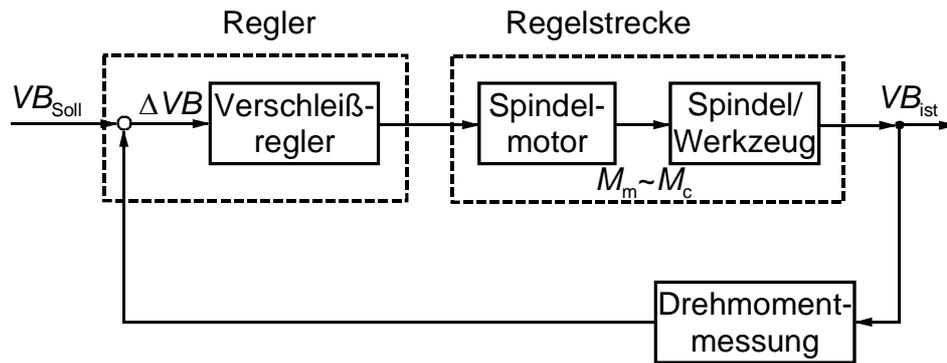


Bild 8.7 Verschleißregelung von Werkzeugen zur Zerspanung

8.2.1 Zustandsregelung

Die in Bild 8.8 dargestellte Struktur einer Zustandsregelung zur Regelung des Werkzeugverschleißes fasst in einem Regler die wichtigsten Zustandsgrößen, die Schnittmomentistwerte $M_{c,ist}$, die Werkzeugdrehzahlwerte n_{ist} und die Istwerte der Verschleißmarkenbreite VB_{ist} zusammen. Analog zur Lageregelung lässt sich diese Zustandsregelung in eine Kaskadenregelung umwandeln. Die Ermittlung der Verstärkungsfaktoren K_0, K_1, K_2, K_3 können bei der Zustandsregelung nicht wie bei der Kaskadenregelung für die jeweiligen Regler unabhängig voneinander eingestellt werden, sondern müssen aus der Dynamik der Regelstrecke berechnet werden. Daher werden Zustandsregler meist in Verbindung mit einem Zustandsbeobachter verwendet, wenn die Zustandgrößen messtechnisch schwierig erfassbar sind. Der Rückschluss eines abgeleiteten Signals auf einen Istwert führt oft zu ungenauen und stark verrauschten Zustandgrößen. Eine mathematische Nachbildung der Regelstrecke und der Ableitung der Zustandgrößen aus diesem mathematischen Modell kann zu einer Verbesserung des Rauschens führen. Ein solches mathematische Modell zur Ermittlung der Zustandgrößen heißt *Beobachter*.

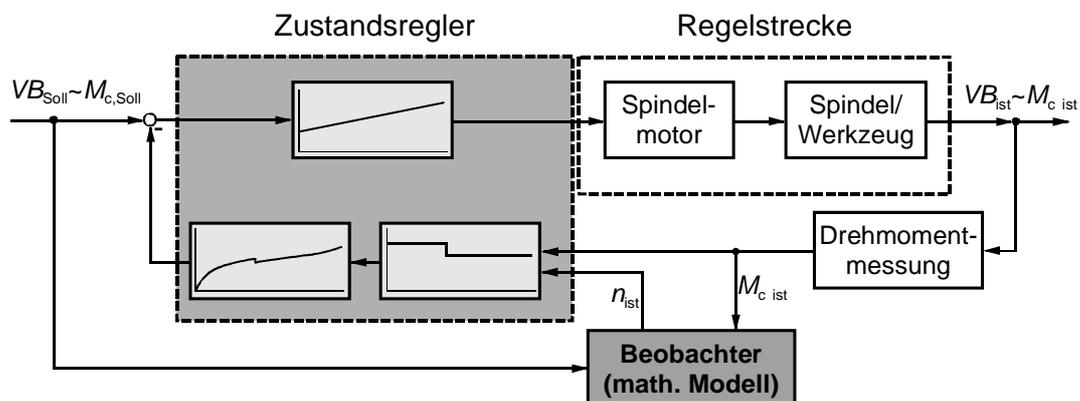


Bild 8.8 Verschleißzustandsregler mit Beobachter

8.2.2 Regelalgorithmus in der Simulation

Für die Simulation des vorgestellten Ansatzes wird die in Bild 8.9 dargestellte Struktur des Blocks *Regelung* näher beschrieben. Damit die einzelnen Simulationsläufe vergleichbar sind, müssen sie von einem definierten Zustand starten. Durch die *Initialisierung* des Simulationsprogramms wird ein bestimmter Anfangszustand hergestellt. Bei aktivem Werkzeugwechsel werden die geregelte Schnittgeschwindigkeit und die theoretische, höhere Schnittgeschwindigkeit dem Wert der momentanen Schnittgeschwindigkeit gleichgesetzt, damit nach Beendigung des Regelvorgangs, das heißt bei Einsatz eines neuen Werkzeugs wieder (theoretische) Schnittgeschwindigkeit verwendet wird, die der Werkzeugwechselstrategie angepasst ist.

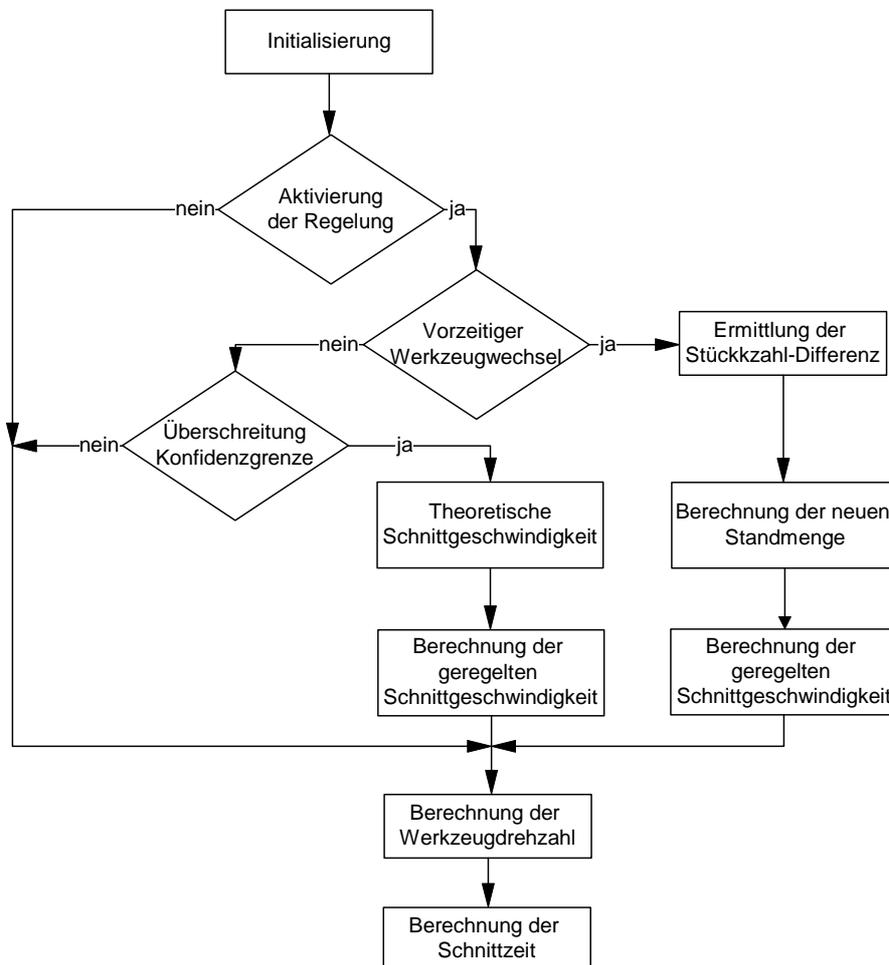


Bild 8.9 Regelalgorithmus im Simulationsprogramm

Bild 8.6 zeigt, dass in der Registerkarte *Werkzeugwechsel* des Blocks *Parameter/Start* die Regelung über einen Schalter deaktiviert werden kann. Hierdurch entfällt die Prüfung der *Überschreitung der Konfidenzgrenze* und das Simulationsprogramm folgt dem direkten Pfad zur *Berechnung der Drehzahl* entsprechend folgender Gleichung

$$v_c = \frac{\pi \cdot n_{rot} \cdot D}{1000} . \quad (8.8)$$

Dieses beschreibt einen regulären Verlauf des Zerspanungsprozesses. Da die Regelung nicht aktiv ist, soll auch keine Änderung der Werkzeugdrehzahl stattfinden. Da die vorgegebene, theoretische Schnittgeschwindigkeit nicht verändert wird, errechnet sich die Schnittzeit t_c aus der Werkzeugdrehzahl n_{rot} .

Ist die Regelung aktiviert, so wird überprüft, ob ein *vorzeitiger Werkzeugwechsel* auf Grund von frühzeitigem Verschleiß erforderlich ist. Der Regelprozess wird mit Ermittlung der *Stückzahl-Differenz*, die auf Grund des vorzeitigen Werkzeugwechsels entstehen würde, ausgelöst. Diese Differenz wird zur Sollstückzahl addiert und somit eine Hilfsgröße als *neue Standmenge* festgelegt, um die voreingestellte Werkzeugwechsel-Strategie zu erreichen. Von dieser Hilfsgröße ausgehend wird die *geregelt* *Schnittgeschwindigkeit* berechnet. Dementsprechend wird die zu verändernde Werkzeugdrehzahl und die resultierende Schnittzeit ermittelt, wobei die neue Schnittzeit somit größer als die ursprüngliche Schnittzeit ist.

Kommt es bei aktivierter Regelung nicht zu einem vorzeitigen Werkzeugwechsel, so wird eine *Überschreitung der Konfidenzgrenze* überprüft. Wird das zulässige Drehmoment $M_{c, \text{Limit}}$ überschritten und ist ein übermäßiger Verschleißes zu vermuten, dann wird die Schnittgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom gegenwärtigen Verschleiß ermittelt. Der Verschleiß wird aus der Beziehung zur aktuellen Schnittkraft mit der Proportionalität der Verschleißmarkenbreite zur Schnittzeit und zur Stückzahl sowie der Proportionalität der Schnittkraft zum Schnittmoment über das gegenwärtige Schnittmoment abgeleitet. Die erforderliche Reduzierung der aktuellen Schnittgeschwindigkeit kann aus einem Kennlinienfeld, wie in Bild 6.9 dargestellt, abgelesen werden. Anschließend werden die entsprechende *geregelt* *Werkzeugdrehzahl* und die neue *Schnittzeit* nach der *geregelt* *Schnittgeschwindigkeit* ermittelt.

8.3 Ergebnisse der Simulation

Für alle möglichen Kombinationen der vier unterschiedlichen Einstellungen der Werkzeugwechselzeiten mit den verschiedenen Regelwahrscheinlichkeiten erfolgte eine separate Auswertung. Eine Datenreihe ist für jeden der 50 Datensätze sowohl für die kumulierte Zeit als auch für die Ausbringung gebildet und die Anzahl der Werkzeugwechsel N_{WZW} eines jeden Simulationslaufs ermittelt worden.

Entsprechend der oben genannten Werkzeugwechsel-Strategie und den ω_{nom} Werten aus Tabelle 8.1 ergeben sich nach einem Simulationszeitraum von 9120 Minuten die in Tabelle 8.2 dargestellten mittleren Soll-Werte für die Ausbringung und die Anzahl der durchzuführenden Werkzeugwechsel.

Tabelle 8.2 Mittlere Soll-Ausbringung ω_{nom} und mittlere Soll-Zahl der Werkzeugwechsel N_{nomWZW}

Werkzeugwechsel-Zeit	N_{nomWZW}	ω_{nom}
LN(7,58; 4,0)-verteilt	350	7.000
LN(10; 2)-verteilt	320	6.401
7,6 min	347	6.947
3,5 min	411	8.232

Da die konstante Werkzeugwechsel-Zeit von 7,6 Minuten dem Erwartungswert der LN(7,58; 4,04) Verteilung entspricht, liegen deren Soll-Werte dicht zusammen.

8.3.1 Darstellung und Bewertung

In Bild 8.10 sind Graphen der Ausbringungen ω für verschiedene Intervallgrenzen, das heißt bei unterschiedlichen Regelwahrscheinlichkeiten, der Ausbringung ω einer Transferlinie *ohne* zuverlässigkeits-adaptiven Regelung (Non-RAC) gegenübergestellt. Simulationsläufe mit Regelwahrscheinlichkeiten von 2 % bis 5 % haben *weite* Konfidenzgrenzen, mit Regelwahrscheinlichkeiten von 10 % bis 20 % *mittlere* Konfidenzgrenzen und mit Regelwahrscheinlichkeiten von 30 % und 40 % *enge* Konfidenzgrenzen.

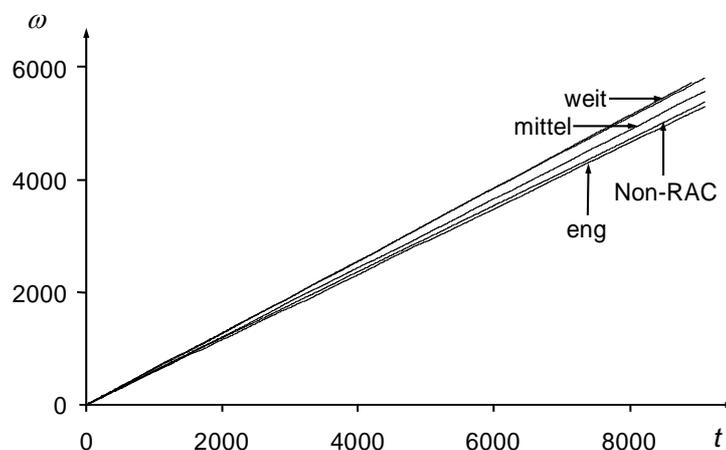


Bild 8.10 Ausbringung ω für verschiedene Intervallgrenzen (weit, mittel, eng) verglichen zu einer Transferlinie ohne zuverlässigkeits-adaptiver Regelung (Non-RAC zweiter Graph von unten)

Die Ausbringung ω bei Regelung mit *weiten* Konfidenzgrenzen liegt signifikant oberhalb der eines Non-RAC Simulationslaufs, auch wenn bei einer Regelung mit *mittleren* Konfidenzgrenzen der Betrag der Ausbringung sinkt, bleibt die Differenz zum Non-RAC Simulationslauf erkennbar. Der Graph mit *engen* Konfidenzgrenzen, das heißt mit einer Regelwahrscheinlichkeit von 30 % beziehungsweise 40 %, liegt unterhalb des Non-RAC Graphen und die Ausbringung fällt somit *geringer* aus als ohne Regelung.

Obwohl sich in Bild 7.7 der Regeleingriff schon frühzeitig bemerkbar macht, sind die Differenzen in der Simulation auf Grund der grafischen Auflösung ab einem Simulationszeitpunkt von ca. 2000 Minuten deutlich erkennbar. Auf Grund der längeren Instandhaltung ergeben Simulationsläufe mit einer LN(10; 2)-verteilten Werkzeugwechselzeit im Vergleich zu Simulationsläufen mit einer LN(7,58; 4,04)-verteilten Werkzeugwechselzeit eine um etwa 500 Werkstücke geringere Ausbringung.

Da die konstante Werkzeugwechselzeit von 7,6 Minuten dem Mittelwert der LN(7,58; 4,04)-Verteilung entspricht, liegen die Ausbringungen für die geregelten Läufe auch in einem ähnlichen Wertebereich. Der Graph des Non-RAC Simulationsverlaufs liegt näher am Graph mit *enger* Konfidenzgrenze und gleichzeitig vergrößert sich die Differenz des Non-RAC Graphen zum Graphen mit *weiter* Konfidenzgrenze. Demnach erbringt der Non-RAC Simulationslauf bei einer konstanten Werkzeugwechselzeit von 7,6 min eine geringere Ausbringung als bei einer LN(7,58; 4,04)-verteilten Werkzeugwechselzeit.

Der Graph für weite Konfidenzgrenzen erreicht bei einer konstanten Werkzeugwechselzeit von 3,5 Minuten wie bei den anderen Werkzeugwechselzeiten, die höchsten Werte für die Ausbringung. Die Simulationsläufe mit der Werkzeugwechselzeit von 3,5 Minuten weisen jedoch im Vergleich zu den Läufen der anderen drei Werkzeugwechselzeiten die höchsten Ausbringungen bei allen Konfidenzgrenzen auf, deshalb ist ein Zusammenhang zwischen Ausbringung und Werkzeugwechselzeit nahe liegend.

Anhang A zeigt eine Gegenüberstellung der Graphen aller Regelwahrscheinlichkeiten zum Non-RAC Verlauf für alle vier Werkzeugwechselzeiten.

Das Diagramm in Bild 8.11 gibt die mittleren Zahlen der Ausbringungen für die verschiedenen Regelwahrscheinlichkeiten und somit der unterschiedlichen Konfidenzgrenzen entsprechend der jeweiligen Werkzeugwechselzeit wieder. Die Ordinate gibt die Ausbringung ω für die auf der Abszisse aufgetragenen unterschiedlichen Regelwahrscheinlichkeiten. Für jede Regelwahrscheinlichkeit sind vier verschiedene Säulen dargestellt: eine weiße für eine LN(7,58; 4,04)-verteilte und eine graue für eine LN(10; 2)-

verteilte Werkzeugwechsel-Zeit, sowie eine schraffierte Säule für konstante 7,6 Minuten als auch eine schwarze für konstante 3,5 Minuten Werkzeugwechsel-Zeit. Jede Säule repräsentiert die Ausbringung bei der jeweiligen Regelwahrscheinlichkeit und einer bestimmten Werkzeugwechsel-Zeit. Die linke Rubrik Non-RAC stellt die Ausbringung bei unregelmäßigem Lauf dar. Die rechte Rubrik „Soll“ diejenige, die als Soll-Ausbringung nach Tabelle 8.2 errechnet wurde.

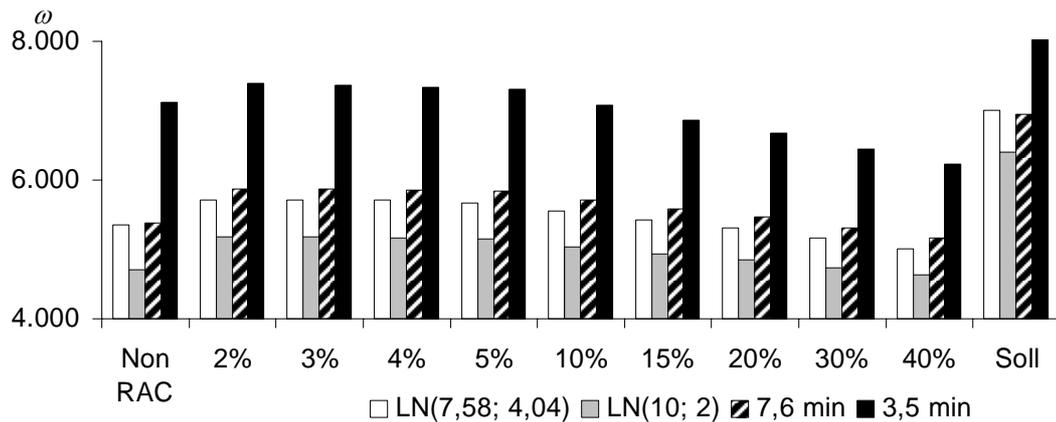


Bild 8.11 Ausbringung ω bei verschiedenen Regelwahrscheinlichkeiten und verschiedenen Werkzeugwechselzeiten

Die Soll-Ausbringung wird in keinem der Fälle erreicht. Das Diagramm zeigt jedoch eindeutig, dass die Ausbringung ω mit *weiten* Konfidenzgrenzen, das heißt mit einer Regelwahrscheinlichkeit zwischen 2 % bis 5 % erst ansteigt und danach bei *mittleren* Konfidenzgrenzen bei einer Regelwahrscheinlichkeit von 10 % bis 20 % abnimmt und schließlich bei *engen* Konfidenzgrenzen ab einer bestimmten Regelwahrscheinlichkeit unterhalb der Ausbringung der Non-RAC Simulationsläufe liegt.

Das Diagramm in Bild 8.12 zeigt die mittlere Anzahl der Werkzeugwechsel für die selben Kombinationen der Parameter.

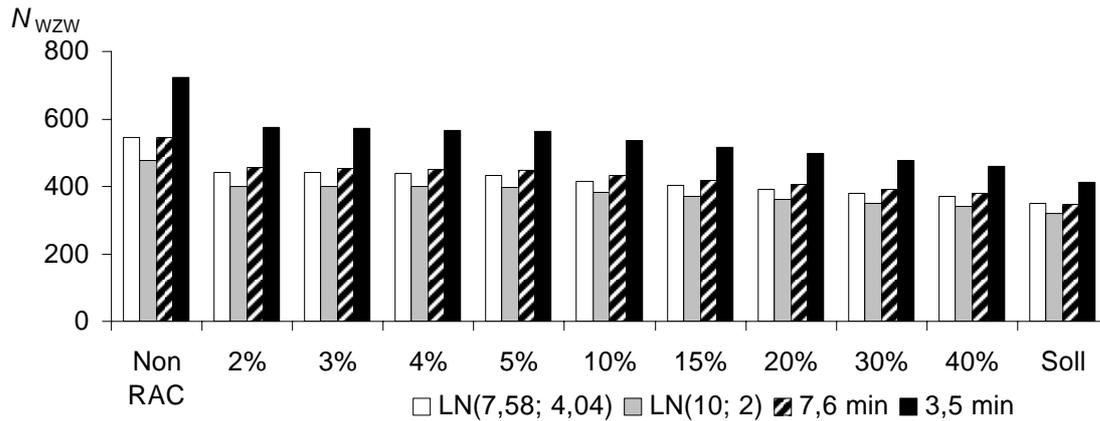


Bild 8.12 Anzahl der Werkzeugwechsel N_{WZW} bei verschiedenen Regelwahrscheinlichkeiten und verschiedenen Werkzeugwechselzeiten

Die Ordinate stellt die Anzahl der durchgeführten Werkzeugwechsel für die auf der Abszisse aufgetragenen unterschiedlichen Regelwahrscheinlichkeiten dar. Die Anzahl der Werkzeugwechsel sinkt mit steigender Regelwahrscheinlichkeit, wobei der größte Sprung beim Übergang von Non-RAC zur Regelwahrscheinlichkeit mit 2 % erreicht wird und sich die Anzahl der Werkzeugwechsel dann asymptotisch der Soll-Zahl nähert. Es wird deutlich, dass bereits eine Regelung mit *weiten* Konfidenzgrenzen, das heißt relativ geringer Regelwahrscheinlichkeit zu einer deutlichen Reduzierung der Werkzeugwechsel-Zahl und somit zur Erhöhung der Ausbringung ω führt.

Die Ergebnisse der Auswertung für die Ausbringungen ω und mit den erforderlichen Werkzeugwechsel N_{WZW} bei den verschiedenen Parameterkombinationen sind in Tabelle 8.3 aufgeführt.

Tabelle 8.3 Ausbringung ω und Anzahl der Werkzeugwechsel N_{WZW} verschiedener Kombinationen der Simulationsparameter /Wol01/

		Werkzeugwechsel-Zeit							
		LN(7,58; 4,0) min		LN(10; 2) min		7,6 min		3,5 min	
		ω	N_{WZW}	ω	N_{WZW}	ω	N_{WZW}	ω	N_{WZW}
Regelwahrscheinlichkeit	ungeregelt	5,358	544	4,699	476	5,381	545	7,126	723
	2 %	5,712	443	5,174	401	5,875	456	7,398	575
	3 %	5,706	441	5,176	401	5,869	454	7,371	571
	4 %	5,716	439	5,165	399	5,849	451	7,337	566
	5 %	5,674	436	5,152	396	5,844	448	7,310	562
	10 %	5,548	419	5,042	382	5,705	432	7,081	536
	15 %	5,417	406	4,941	370	5,582	417	6,860	514
	20 %	5,315	397	4,855	364	5,461	407	6,682	498
	30 %	5,166	379	4,740	360	5,313	404	6,449	492
	40 %	5,010	370	4,635	341	5,171	382	6,233	495

Die grau hinterlegten Zellen der Tabelle 8.3 kennzeichnen die Ausbringungen, die unter der Ausbringung des jeweiligen Non-RAC Simulationslaufs liegen. Bei einer konstanter Werkzeugwechsel-Zeit von 3,5 Minuten ist die Ausbringung bei einer Regelwahrscheinlichkeit von 10 % bereits geringer als bei dem entsprechenden Non-RAC Simulationsverlauf. Bei konstanten 7,6 Minuten tritt dieser Effekt erst ab einer Regelwahrscheinlichkeit von 30 % und bei LN(10; 2)-verteilten Werkzeugwechsel-Zeiten sogar erst ab 40 % Regelwahrscheinlichkeit ein.

Das Diagramm in Bild 8.13 zeigt die prozentualen Differenzen der Ausbringung ω bei den unterschiedlichen Regelwahrscheinlichkeiten und allen Werkzeugwechsel-Zeiten gegenüber der Ausbringung Non-RAC Simulationsverlaufs.

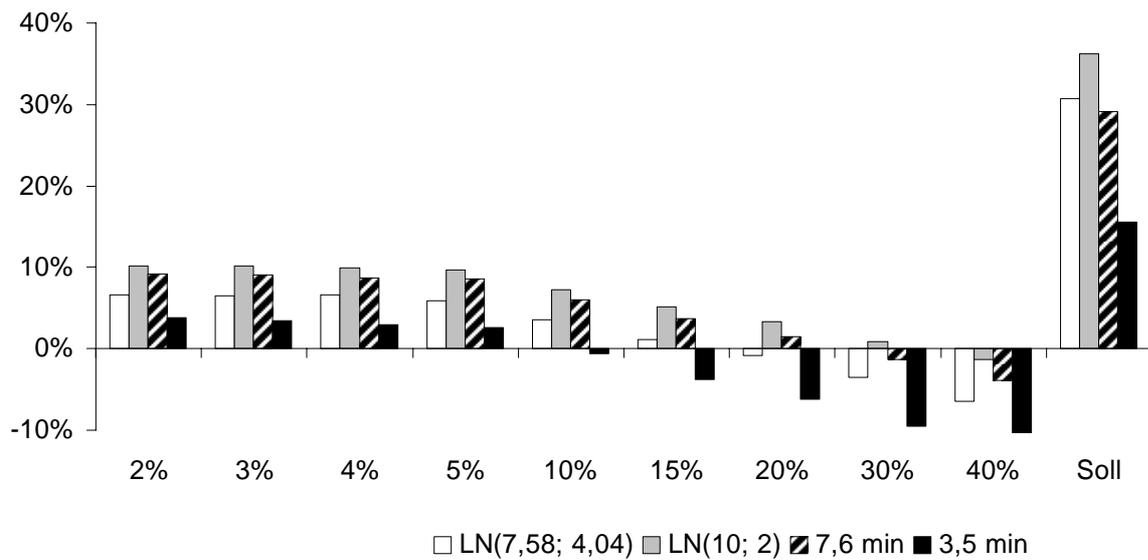


Bild 8.13 Differenz der Ausbringung ω bei unterschiedlich geregelten Simulationsläufen zur Ausbringung eines unregulierten (Non-RAC) Simulationslaufs

Die Ausbringung erhöht sich im Bereich weiter Konfidenzgrenzen mit einer 2 % bis 5 % Regelwahrscheinlichkeit um 5 % bis 10 %. Ab einer *mittleren* Konfidenzgrenze mit einer 10 % Regelwahrscheinlichkeit nimmt dieser Zuwachs ab und mit einer *engen* Konfidenzgrenze bei einer Regelwahrscheinlichkeit von 30 % bzw. 40 % sinkt die Ausbringung unter den Wert eines Non-RAC Simulationslaufs. Bei höherer Regelwahrscheinlichkeit erhöht sich die Anzahl der Regeleingriffe, wobei jeder Eingriff mit einer Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit verbunden ist. Ab einer bestimmten Häufigkeit der Regeleingriffe erhöht sich die Taktzeit der Transferlinie, somit werden weniger Werkstücke im gleichen Zeitraum produziert als bei einer geringeren Taktzeit. In gleicher Weise verhält es sich mit der maximalen Höhe des Ausbringungszuwachses: Bei einer hohen mittleren Dauer der Werkzeugwechsel von 10 min wird ein maximales Plus bei der Ausbringung von über 10 % erreicht, bei einer mittleren Dauer von 7,6 min beträgt der maximale Zuwachs 6 % bis 9 %. Bei einer Werkzeugwechsel-Dauer von 3,5 min erreicht die Ausbringung nur noch eine maximale Steigerung von etwa 4 %.

In Bild 8.14 wird die Differenz erzielte Ausbringung ω bei den unterschiedlichen Konfidenzgrenzen mit den Soll-Werten verglichen.

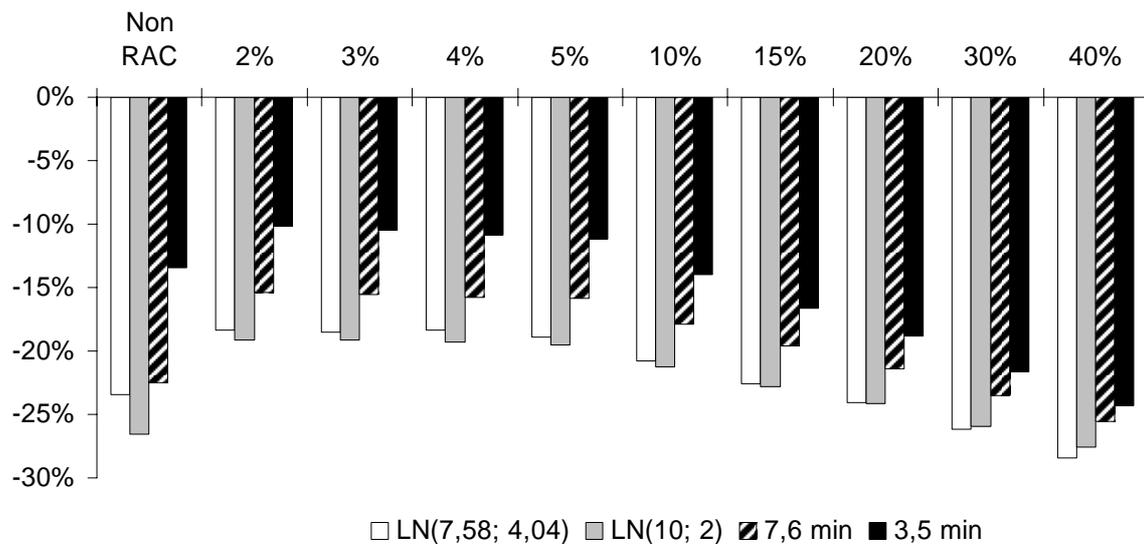


Bild 8.14 Differenz der Ausbringung ω bei unterschiedlich geregelten Simulationsläufen zur Soll-Ausbringung

Bei einem Non-RAC Simulationsverlauf werden 73 % bis 86 % der Soll Ausbringung erreicht, bzw. die Differenz beträgt 14 % bis 27 %. Durch den Einsatz der Regelung verringert sich dieser Wert je nach Dauer der Werkzeugwechsel auf 10 % bis 19 %. Damit sind 81 % bis 90 % der Soll-Ausbringung erreicht. Die Verringerung der Differenz zu den Soll-Werten erfolgt hier mit Einsatz der Regelung erst sprunghaft, nimmt dann mit wachsender Regelwahrscheinlichkeit erst gering und anschließend stärker zu. Bei mittleren und insbesondere bei engen Konfidenzgrenzen ist die Regelung ineffektiv.

Beurteilung der Simulationsergebnisse

Das Ziel der Regelung, die Einhaltung der Werkzeugwechsel-Strategie, wird selbst beim Auftreten vorzeitiger Werkzeugwechsel, die durch Werkzeugbruch oder ähnliche Phänomene verursacht werden, erreicht. Für den Fall der LN(7,58; 4,04)-verteilten Werkzeugwechsel-Zeit kann bereits bei einer Regelwahrscheinlichkeit von 2 % die Anzahl der Werkzeugwechsel von 544 um 18,68 % auf 443 verringert werden und bei anderen Werkzeugwechsel-Zeiten beträgt die Reduzierung der Anzahl von Werkzeugwechsel zwischen 15,69 % und 20,59 %. Die Reduzierung *unplanmäßiger* Werkzeugwechsel muss entsprechend der Ausbringung ω betrachtet werden, da die Ausbringung engeren Konfidenzgrenzen abnehmen kann. Daher ist die optimale Regelwahrscheinlichkeit zu bestimmen.

Da in der Anwendung davon ausgegangen werden kann, dass die eingesetzten Werkzeuge entsprechend dem zu bearbeitenden Werkstückmaterial eingesetzt werden, wird eine geringer vorzeitiger Verschleiß der Werkzeuge angenommen und somit bei der Umsetzung des vorgestellten Ansatzes durch Reduzierung der unplanmäßigen Werkzeugwechsel ein Erhöhung der Ausbringung um 2,5 % bis 10 % vermutet.

Zu Beachten ist, dass bei einer Anlage mit unterdurchschnittlich geringer Dauer für die Werkzeugwechsel der Ausbringungszuwachs wesentlich geringer ausfällt als bei einer durchschnittlich hohen Werkzeugwechsel-Dauer. Bereits bei einer Regelwahrscheinlichkeit von 10 % nimmt die Ausbringung ab. Bei höheren, vor allem bei überdurchschnittlich hohen Werkzeugwechsel-Zeiten besitzt die Regelung ihre größte Effektivität.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Schlüsselthemen der Massenfertigung sind Ausbringung, Verfügbarkeit und Kosteneffizienz. Der Wirkungsgrad einer Transferlinie wird direkt über die Anzahl der produzierten Werkstücke bezogen je Zeiteinheit bewertet. In diesem Zusammenhang spielt der Werkzeugwechsel als Instandhaltungsmaßnahme eine wichtige Rolle für die Systemleistung.

Eine Transferlinie ist ein Massenproduktionssystem, das aus einer begrenzten Anzahl von Stationen besteht, die jede unterschiedliche Bearbeitungen an Werkstücken durchführen. Sind die Bearbeitungen abgeschlossen, werden alle Werkstücke gleichzeitig zur entsprechend nächsten Station transportiert. Die Station mit der langsamsten Bearbeitung bestimmt die Dauer der Taktzeit. Bedeutend für die Ermittlung der System-Verfügbarkeit ist, dass die Transferlinien keine Material-Puffer haben.

Im ersten Kapitel werden Verfügbarkeitsanalysen an Transferlinien diskutiert. Dabei belegen die empirisch ermittelten Ergebnisse, dass neben den verschiedenen Stillstandsursachen an einzelnen Stationen ein Optimierungsbedarf in der Organisation beziehungsweise im Management der Werkzeugwechsel besteht. Es wurde festgestellt, dass häufig wegen frühzeitig erhöhtem Werkzeugverschleiß oder -bruch von einer in der Hauptsteuerung eingerichteten Werkzeugwechsel-Strategie abgewichen wurde. Diese unplanmäßigen Werkzeugwechsel bedeuten ein hohes Potential zur Steigerung der System-Verfügbarkeit, da die gesamte Transferlinie unproduktiv ist, wenn an nur einer Station das Werkzeug gewechselt wird.

Zunächst werden die notwendigen Grundlagen der Zerspanungstechnik und das Standzeitverhalten von Werkzeugen dargestellt und anschließend verschiedene Methoden der Verschleißüberwachung und -diagnose von spanenden Werkzeugen beschrieben. Darauf folgend sind die für den neuen Ansatz der zuverlässigkeits-adaptiven Werkzeugwechselstrategie erforderlichen Grundlagen der Verfügbarkeitsanalyse, insbesondere in Bezug auf den Werkzeugwechsel an Transferlinien, vorgestellt.

Zur Zuverlässigkeitsabschätzung von Werkzeugen zum Erreichen einer vorgegebenen Werkzeugwechsel-Strategie sind Betriebsdauerdaten an Vollhartmetallbohrern, die in der Massenfertigung eingesetzt werden, empirisch ermittelt und die Krafteinwirkung auf Grund des Verschleißes analysiert worden. Die Qualitätsanforderungen an die Bearbeitung bestimmen den maximal zulässigen Werkzeugverschleiß, der in direktem Zusammenhang mit der Werkzeugzuverlässigkeit steht. Das Erreichen der maximalen Ver-

schleißmarkenbreite wird als Ausfall des Werkzeugs (Beendigung der Fähigkeit einer Einheit, eine geforderte Funktion zu erfüllen IEC 60050-191-04-01 /IEC 60050/) betrachtet.

Der Werkzeugverschleiß kann entweder optisch in bestimmten Intervallen gemessen oder während des Betriebs über einen Vergleich der aktuellen Schnittkraft mit der Schnittkraft-Regressionsfunktion beobachtet werden. Anhand von Schnittkraft-Kennlinie kann der Freiflächenverschleiß auf Basis der gemessenen Schnittkraft beurteilt und eine Prognose erstellt werden, wie viele Werkstücke gefertigt werden können, bis ein Werkzeugwechsel erforderlich ist. Die Korrelation zwischen Verschleißmarkenbreite und Schnittkraft wird angewandt, um festzustellen, ob die vorgegebenen Zuverlässigkeitsanforderungen in Bezug auf die zu produzierenden Werkstücken erreicht werden. Unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit eines Werkzeugausfalls können die Schnittparameter so angepasst werden, dass die erforderliche Anzahl zu produzierender Werkstücke erreicht wird. Damit ist eine so genannte Punktlandung bezogen auf die Zeit bis zum Ausfall des Werkzeugs (time to failure, *TTF*) im Bereich der vorgegebenen nominalen und maximalen Dauer des Werkzeugzyklus möglich.

Auf dieser Idee basierend wird eine zuverlässigkeits-adaptive Regelung (reliability-adaptive control, RAC) des Werkzeugverschleißes zur Einhaltung einer vorgegebenen Werkzeugwechselstrategie vorgestellt.

Auf Grund der durchgeführten Analyse der Betriebsdauerdaten wird die *TTF* von Werkzeugen als quasi deterministisch angesehen. Die Betriebstrategie auf Systemebene wird (unter Berücksichtigung, dass ein Maximum verschiedener Werkzeuge gleichzeitig instand gehalten wird) dazu genutzt, den Werkzeugverschleiß im frühen Stadium in eine vordefinierte Harmonisierung der Werkzeugwechsel (Werkzeugwechsel-Strategie) wieder zurückzuführen. Dabei werden die Werkzeuge grob in drei Verschleiß-Kategorien klassifiziert: mit "gut" für den Fall eines Verschleißes in akzeptablem Bereich und "schlecht" beziehungsweise "sehr schlecht" für die Fälle von unakzeptablem Verschleiß. Die Effektivität der RAC wird anhand mehrere Beispiele verschiedener Betriebsmodi mit unterschiedlichen Instandhaltungsstrategien beurteilt. Dabei zeigen die analytischen Ansätze, dass die momentane Verfügbarkeit einer RAC-Transferlinie in einem gegebenen Zeitintervall der stationären Verfügbarkeit oder für eine ins Unendliche gehende Dauer der asymptotischen Verfügbarkeit entgegenstreben.

Zur weiteren Fundierung der Beispiele des analytischen Ansatzes wird abschließend die Verfügbarkeitssteigerung auf Basis der zuverlässigkeits-adaptiven Regelung des Werkzeugverschleiß durch Simulation validiert.

Die Kurve der Regelwahrscheinlichkeit von 30% liegt unterhalb der Kurve des ungeregelten Simulationslaufs. Die Ausbringung fällt demnach geringer aus.

Im Vergleich ergeben die Simulationsläufe mit längeren Werkzeugwechselzeiten eine geringere Ausbringung. Der Mittelwert einer verteilten Werkzeugwechsel-Zeit ergibt als konstante Werkzeugwechsel-Zeiten zudem eine geringere Ausbringungen als bei Verwendung der Verteilung. Die Simulation zeigte, dass die Ausbringung mit steigender Regelwahrscheinlichkeit zunächst ansteigt, anschließend abnimmt und schließlich ab einer bestimmten Regelwahrscheinlichkeit unterhalb der Ausbringung der Non-RAC Simulationsläufe liegt. Dabei wurde die Soll-Ausbringung in keinem der Fälle erreicht.

Der vorgestellte Ansatz zeigt trotz starker Vereinfachung des Zerspanungsprozesses, dass durch die Regelung des Werkzeugverschleißes die Systemverfügbarkeit einer Transferlinie signifikant gesteigert werden kann. Auch wenn kurzzeitig eine Erhöhung der Taktzeit in Kauf genommen werden muss. In weiteren Arbeiten sollte festgestellt werden, inwieweit sich eine zuverlässigkeits-adaptive Regelung auf andere Bearbeitungsprozesse übertragen lässt. Vor der Anwendung des neuen Ansatzes der zuverlässigkeits-adaptiven Werkzeugwechselstrategie in einer Transferlinie wird auf Grund des Kostenaufwands eine Validierung durch ein Experiment durchgeführt.

10 Literaturverzeichnis

- /Art04/ Artis GmbH: MTC-2 – Systemhandbuch, Version MTC-2.005. Bispingen-Behringen 2000.
- /Bec86/ Becker, W.: Arbeitsicherheit in der Instandhaltung. Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln 1986.
- /BeLe90/ Bertsche, B.; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Maschinenbau, Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeit. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1990.
- /BeFr84/ Beichelt, F.; Franken, P.: Zuverlässigkeit und Instandhaltung. Hanser Verlag, München, Wien 1984.
- /Bir97/ Birolini, A.: Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1997.
- /BeKa00/ Belyaev, Y.; Kahle, W.: Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik bei der Analyse von Zuverlässigkeitsdaten. Teubner Verlag, Stuttgart 2000.
- /Bol81/ Bolotin, V.: Wahrscheinlichkeitsmethoden zur Berechnung von Konstruktionen. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1981.
- /Bos93/ Bosch, K.: Statistik-Taschenbuch. 2. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, 1993.
- /Bro99/ Bronstein, I.N.; Semendjaev, K.A.: Taschenbuch der Mathematik. 4. Auflage, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, Thun 1999.
- /Bul71/ Bulsenko, N.P.: Simulation von Produktionsprozessen. Teubner Verlag, Leipzig, 1971.
- /CzHa92/ Czichos, H.; Habig, K.-H.: Tribologie Handbuch, Reibung und Verschleiß. Vieweg Verlag 1992, Wiesbaden 1992.
- /Deg68/ Degenhardt, U.: Die Bedeutung des Werkzeugverschleißes im Hinblick auf eine Optimierung der Zerspanungsbedingungen. Industrie-Anzeiger 90. Jg. Nr. 93 v. 19. 11. 1968.
- /Die05/ Dietl, C.: Applying the Taylor Approach for Reliability Estimation of Drills. Proceedings of the European Conference on Safety and Reliability – ES-REL 2005, Balkema Publishers, Leiden, London 2005.
- /DIN 6584/ DIN 6584: Begriffe der Zerspantechnik, Kräfte, Energie, Arbeit, Leistung. Beuth Verlag, Berlin 1982-10.

-
- /DIN 8589/ DIN 8589: Fertigungsverfahren Spanen. Beuth Verlag, Berlin 1982-10.
- /DIN 50320/ DIN 50320: Verschleiß; Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebiets. Beuth Verlag, Berlin 1979-11.
- /DIN50150/ DIN 50150: Prüfung metallischer Werkstoffe – Umwertung von Härtewerten. Beuth Verlag, Berlin 2000-10.
- /DiRa04/ Dietl, C.; Rakowsky, U. K.: Reliability-Adaptive Control of Tool Wear in Transfer Lines. Proceedings of the joined PSAM 7 – ESREL 2004, Springer Publishers, Berlin, London 2004.
- /DiRa05/ Dietl, C.; Rakowsky, U. K.: Reliability-Adaptive Tool Change Management of Transfer Lines. Proceedings of the European Conference on Safety and Reliability – ESREL 2005, Balkema Publishers, Leiden, London 2005.
- /DeLuSm93/ Degner, W.; Lutze, H.; Smejkal, E.: Spanende Formung, Theorie, Berechnung, Richtwerte. 13. Auflage, Hanser Verlag, München, Wien 1993.
- /Dub90/ Dubbel, H.: Taschenbuch für den Maschinenbau. 17.Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1990.
- /Ebn95/ Ebner, C.: Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten. Dissertation Technische Universität München, 1995.
- /EsHä72/ Essel, K.; Hänsel, W.: Analyse der Standzeitgleichungen. Industrie-Anzeiger 94. Jg. Nr. 5 v. 18. 1. 1972.
- /Ext99/ Imagine That, Inc. (Hrsg.): Extend (Simulationsprogramm) incl. Extend User's Manual, Version 4, Imagine That, Inc., San Jose 1997
- /FrKi93/ Frank, P. M.; Kiupel Niels: Fuzzy Supervision. Automatisierungstechnik 41, 1993.
- /Ger94/ Gershwin, S. B.: Manufacturing Systems Engineering. Prentice Hall Publisher, New Jersey, London 1994.
- /Gut97/ Gutheil, P.: Beitrag zur Erhöhung der Bearbeitungsqualität und Prozeßsicherheit bei der Hochleistungszerspanung durch Einsatz optoelektronischer Verfahren zur Verschleißerkennung. Dissertation, Fachgebiet Produktionstechnik und Werkzeugmaschinen, Universität Gesamthochschule Kassel , 1997.
- /Har99/ Hartung, J.: Statistik Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik, 9. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, 1993.

- /Häu73/ Häuser, K.: Spanen. Verlag Studiengemeinschaft Kamprath, Darmstadt, 1973.
- /IEC 60050/ International Electrotechnical Commission IEC (ed.): International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 191: Dependability and Quality of Service, 2nd Edition. IEC 60050-191: 2002-05
- /ISO 3685/ International Standard – ISO 3685: Tool-life testing with single-point turning tools. International Organization for Standardisation, Genève, 2. edition 1993.
- KeHe98/ Kennametal Hertel: Produkte zur Metallbearbeitung; Vollhartmetall- Bohrwerkzeuge, Produktinformationen Fa. Kennametal Hertel, Fürth 1999.
- /Kie52/ Kienzle, O.: Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugen und Werkzeugmaschinen. VDI-Zeitung, Düsseldorf (94) Heft 11/12, 1952.
- /KiVi57/ Kienzle, O., Victor, H.: Spezifische Schnittkräfte bei der Metallbearbeitung. Werkstatttechnik und Maschinenbau 47, 1957.
- /KöDeEs72/ König, W.; Depiereux, W.; Essel, K.: Optimierung der Schnittbedingungen für hoch automatisierte Werkzeugmaschinen, Untersuchungen beim Drehen mit erhöhten Schnittbedingungen. Westdeutscher Verlag, Opladen, 1972
- /KöKI97/ König, W.; Klocke, F.: Fertigungsverfahren, Drehen Fräsen, Bohren. 5. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1997.
- /Kön84/ König, W.: Fertigungsverfahren, Drehen Fräsen, Bohren. 2. Auflage, VDI Verlag, Düsseldorf 1984.
- /Kro63/ Kronenberger, M.: Grundzüge der Zerspanungslehre, Theorie und Praxis der Zerspanung für Bau und Betrieb von Werkzeugmaschinen. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1963.
- /Lae97/ Laermann, M.: Berechnung der Verfügbarkeit und zuverlässigkeitstechnische Untersuchung zweier verketteter Transferstraßen anhand von Stillstands- und Betriebszeiten. Diplomarbeit, Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal 1997.
- /LaKe00/ Law, A.; Kelton D.: Simulation Modelling and Analysis. 3.ed, Verlag McGraw Hill, Boston 2000.
- /Lan49/ Lang, M.: Prüfen der Zerspanbarkeit durch Messung der Schnitttemperatur. Carl Hanser Verlag, München 1949.

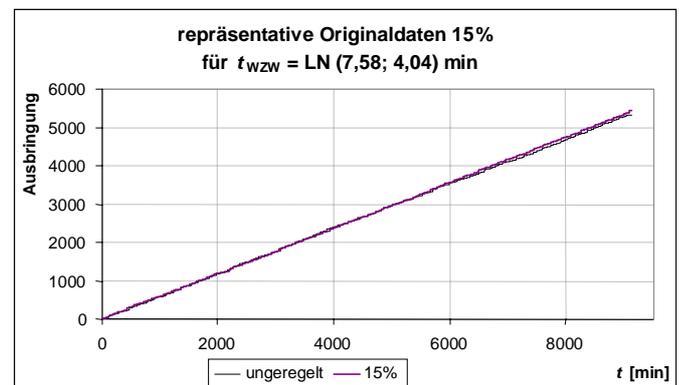
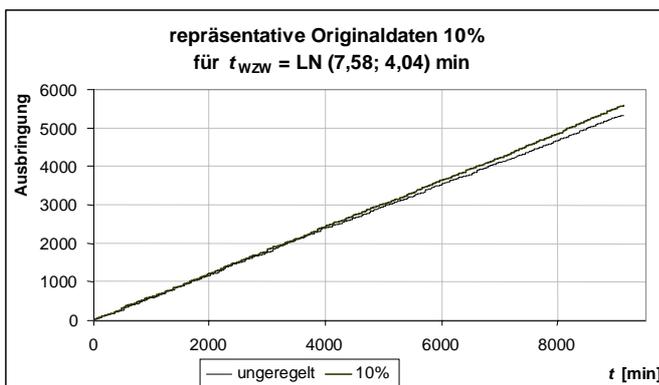
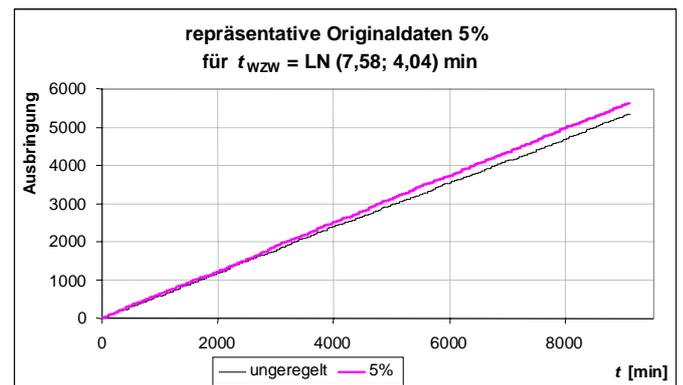
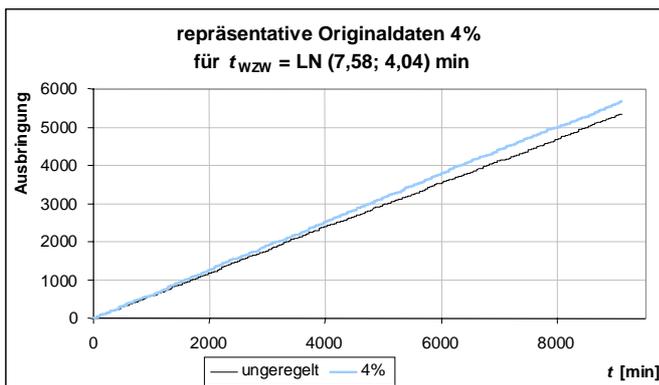
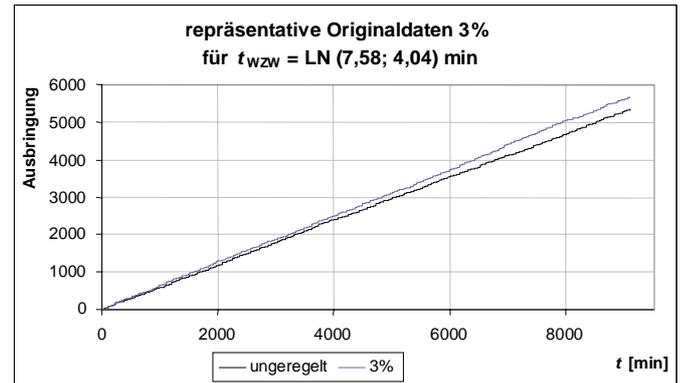
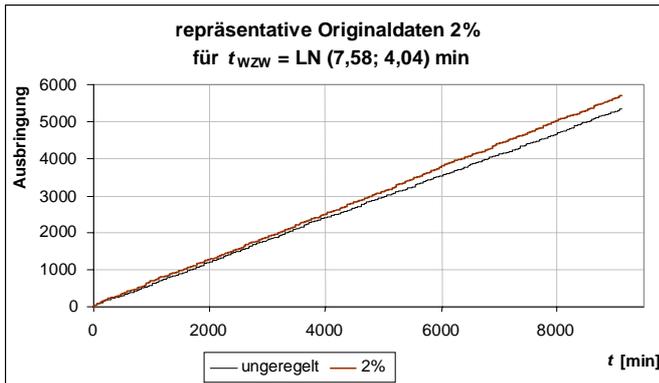
-
- /LuWe05/ Lutz, H., Wendt, W.: Taschenbuch der Regelungstechnik. Harry Deutsch Verlag; Frankfurt am Main 2005.
- /MePa03/ Meyna, A.; Pauli B.: Taschenbuch der Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik, Quantitative Bewertungsverfahren. Hanser Verlag, München, Wien 2003.
- /Mey94/ Meyna, A.: Zuverlässigkeitsbewertung zukunftsorientierter Technologien. Vieweg Verlag, Wiesbaden 1994.
- /MiEb94/ Milberg, J.; Ebner, C.: Verfügbarkeit von Werkzeugmaschinen. Forschungsbericht AiF 8649, Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e. V., Frankfurt 1994.
- /Mil92/ Milberg, J.: Werkzeugmaschinen. Springer Verlag, Berlin 1992.
- /Opi70/ Opitz, H.: Moderne Produktionstechnik, Stand und Tendenzen. Girardet Verlag, Essen 1970.
- /OpKö70/ Opitz, H., König, W., Degenhardt, U., Depiereux, W., Essel, K.: Numerische Optimierung der Bearbeitungsbedingungen während des Drehvorganges. Westdeutscher Verlag, Opladen 1970.
- /OtKu02/ Otto T. Kurik L.: A digital measuring module for tool wear estimation. 13th DAAAM International Symposium, "Intelligent Manufacturing & Automation: Learning from the Nature", 2002-10.
- /PEA/ AMT-Measurement Guideline: Production Equipment Availability. The Association for Manufacturing Technology, McLean, October 1998.
- /Per90/ Perovic B.: Fertigungstechnik, Verfahren, Maschinen, Vorrichtungen, Grundlagen zur Berechnung und Konstruktion. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1990.
- /Sac91/ Sachs, L.: Angewandte Statistik. 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1991.
- /Sau73/ Sauer, L.: Wirtschaftliches Zerspanen. Vogel Verlag, Würzburg 1973.
- /Sau97/ Sautter, R.: Fertigungsverfahren. 1. Auflage, Vogel Verlag, Würzburg 1997.
- /Sch94/ Schindler, H.; et. al.: Hochpräzisionszerspanen mit geometrisch bestimmter Schneide. Band 3, Beuth Verlag, Berlin 1994.
- /Sic00/ Sick, B.: Signalinterpretation mit Neuronalen Netzen unter Nutzung von modellbasiertem Nebenwissen am Beispiel der Verschleißüberwachung von Werkzeugen in CNC-Drehmaschinen. VDI Verlag, Düsseldorf 2000.
- /Stu81/ Stute, G.: Regelung an Werkzeugmaschinen, Fortschritte der Fertigung auf Werkzeugmaschinen. Hanser Verlag, Wien München 1981.

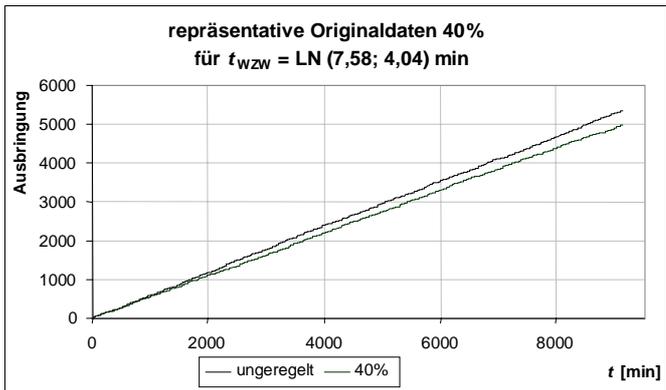
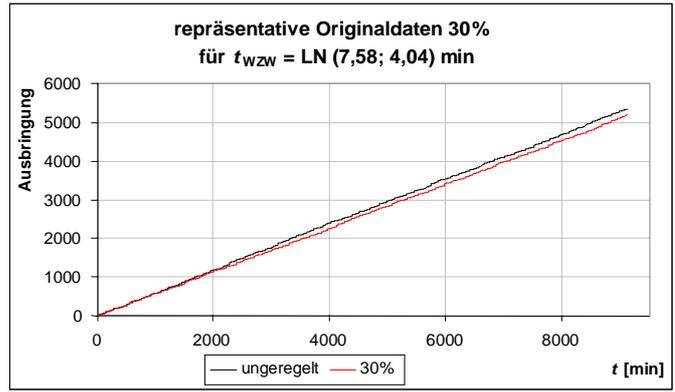
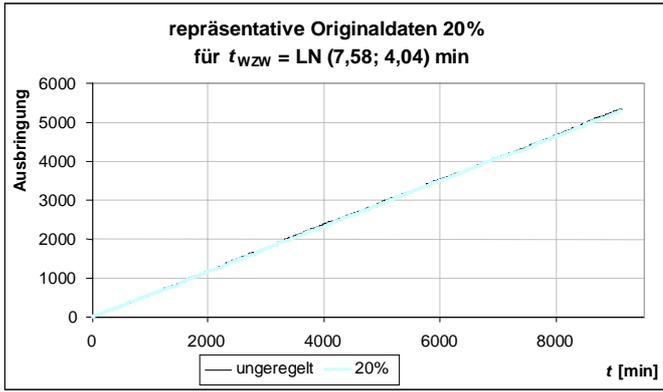
- /StVo92/ Strnad, H.; Vorath, B.: Sicherheitsgerechtes Konstruieren, Entwerfen und Konstruieren gefahrenfreier Technischer Arbeitsmittel und Anlagen. TÜV Rheinland Verlag, Köln 1992.
- /Tay07/ Taylor, F.W.: On the art of cutting metals. Philadelphia, 1907; Deutsche Ausgabe von Wallich, A.: Springer Verlag, Berlin, 1920
- /TeKu92/ Tempelmeier, H; Kuhn, H.: Flexible Fertigungssysteme. Springer Verlag, Berlin, 1992.
- /Tön95/ Tönshoff, H. K.: Spanen; Grundlagen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1995.
- /VDI 3423/ VDI-Richtlinie 3423: Auslastungsermittlung für Maschinen und Anlagen. VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (ADB), Düsseldorf Juli 1994.
- /VDI 3321/ VDI-Richtlinie 3321: Schnittwertoptimierung; Grundlagen und Anwendungen. VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (ADB), Düsseldorf März 1994.
- /VDI 3633/ VDI-Richtlinie 3633: Anwendung der Simulationstechnik zur Materialflussplanung. VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (ADB), Düsseldorf September 1983.
- /ViMüOp82/ Victor, H.; Müller, M.; Opferkuch, R.: Zerspantechnik Teil I. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1982.
- /Vos76/ Voss, W.: Optimierung spanender Fertigung. Technischer Verlag Resch KG, Gräfeling b. München, 1976.
- /Wals92/ Wanke, P.; Isermann, R.: Modellgestützte Fehlerfrüherkennung am Hauptantrieb eines spanabhebenden Bearbeitungszentrums. Automatisierungstechnik 40, 1992.
- /Wec95/ Weck, M.: Werkzeugmaschinen, Fertigungssysteme, Automatisierung und Steuerungstechnik. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1995.
- /Wec98/ Weck, M.: Werkzeugmaschinen, Fertigungssysteme, Maschinenarten und Anwendungsbereiche. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1998.
- /WeLo86/ Weber, H.; Loladze, T.N.; et al.: Grundlagen des Zerspanens. VEB Verlag Technik, Berlin, 1986.
- /Wol01/ Wolters K.: Simulation einer reguläralgorithmischen Optimierung durch Einhaltung einer vorgegebenen Werkzeugwechsel-Strategie zur Erhöhung der Verfügbarkeit einer Transferstraße. Diplomarbeit, Universität Wuppertal, Fachbereich Sicherheitstechnik, Dezember 2001.

Anhang

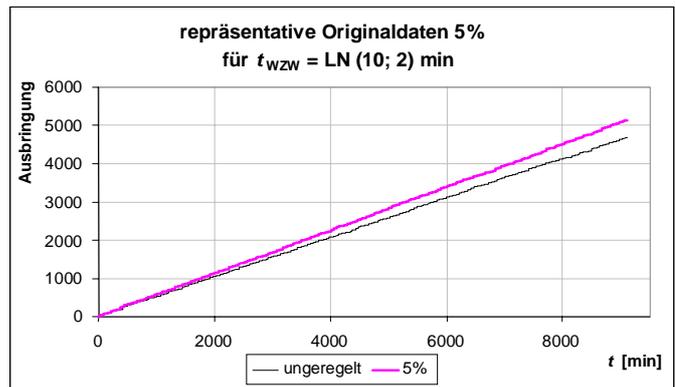
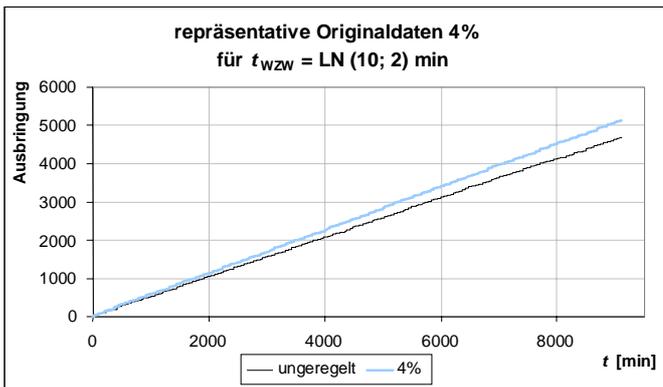
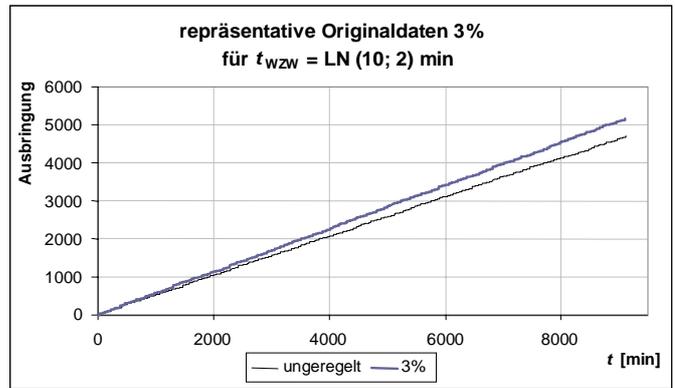
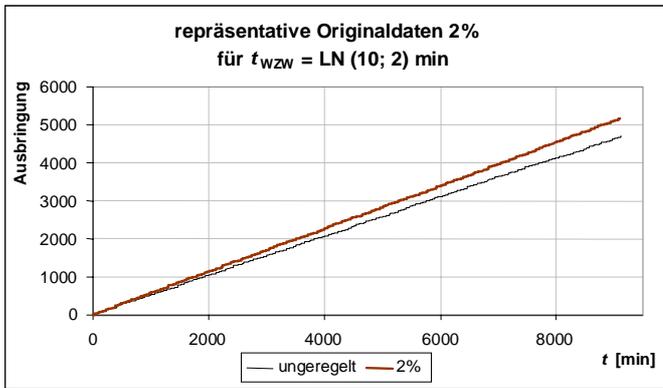
Darstellung der Ausbringung ω über die Zeit bei unterschiedlichen Werkzeugwechsel-Zeiten. Die jeweils gewählten Regelwahrscheinlichkeiten werden dem unregelmäßigen Simulationslauf Non-RAC bei entsprechender Werkzeugwechsel-Zeit gegenübergestellt.

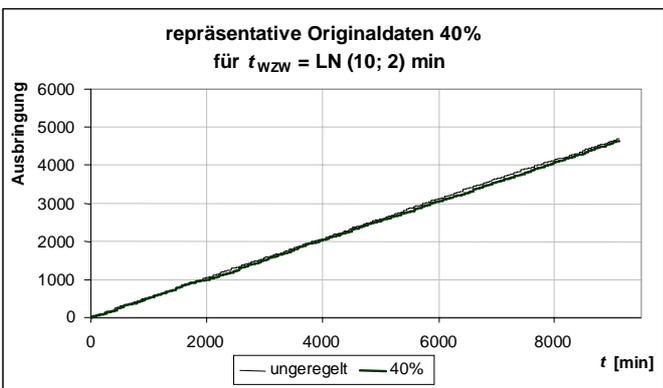
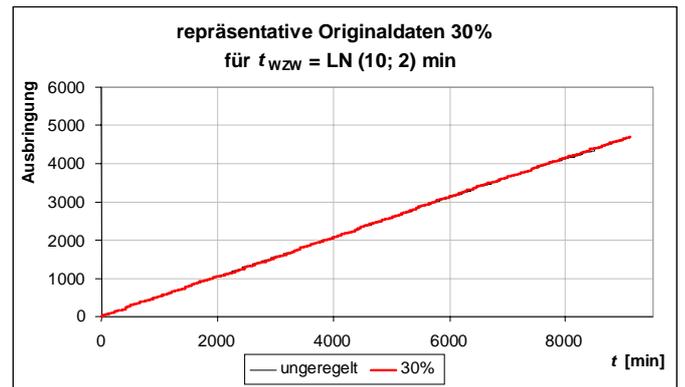
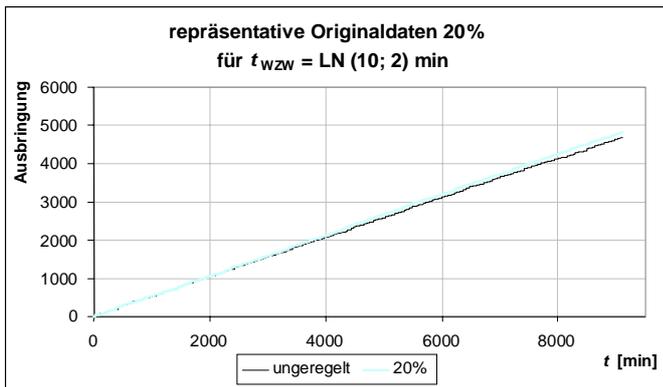
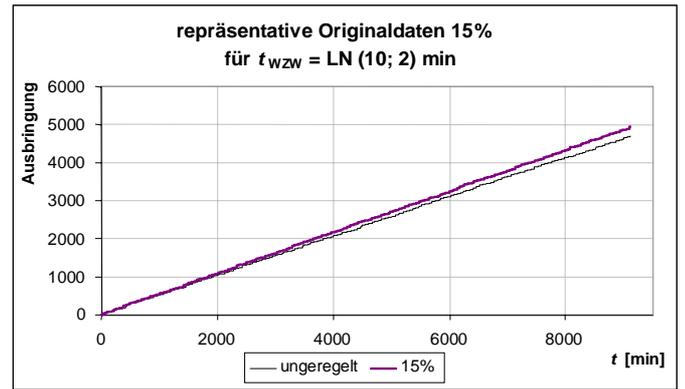
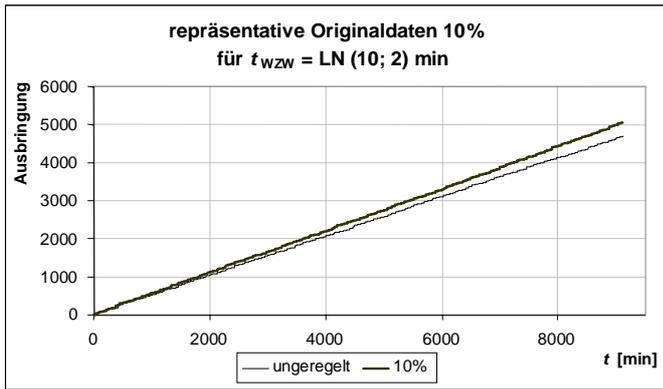
Werkzeugwechsel-Zeit: LN(7,58; 4,04)-verteilt



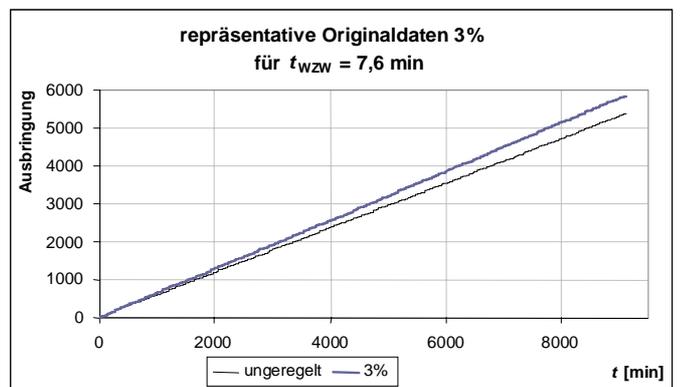
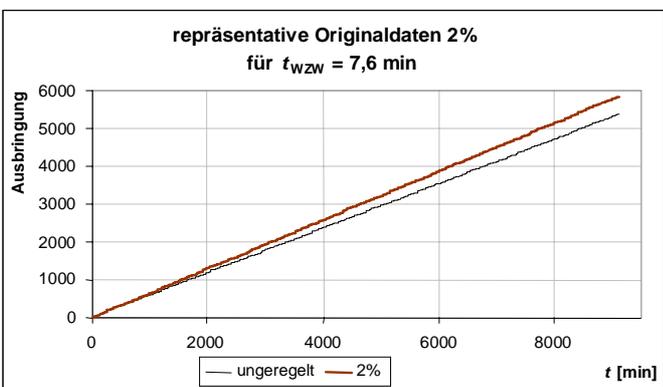


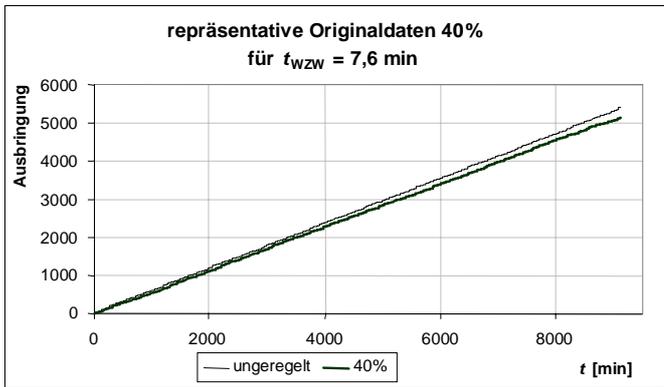
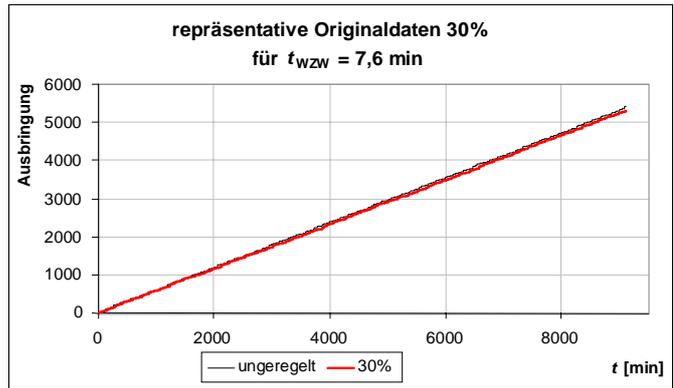
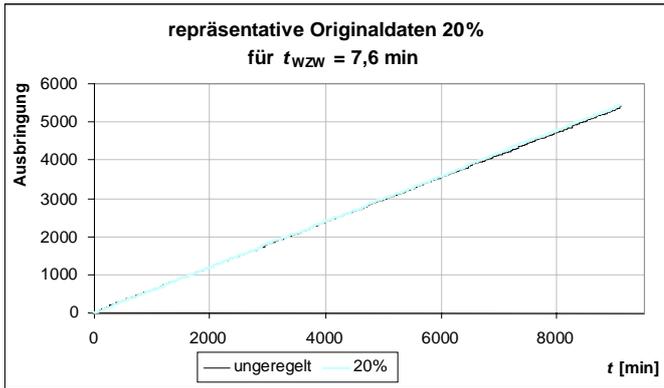
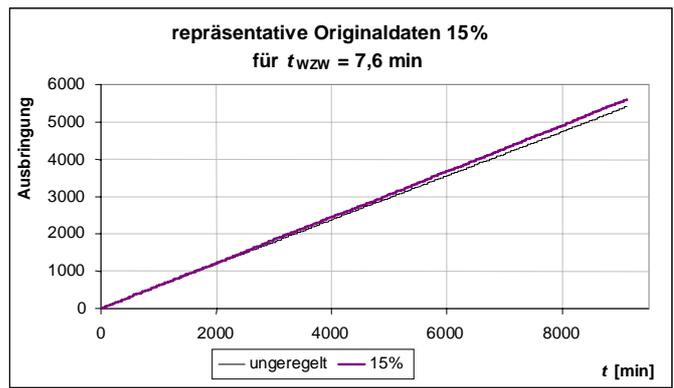
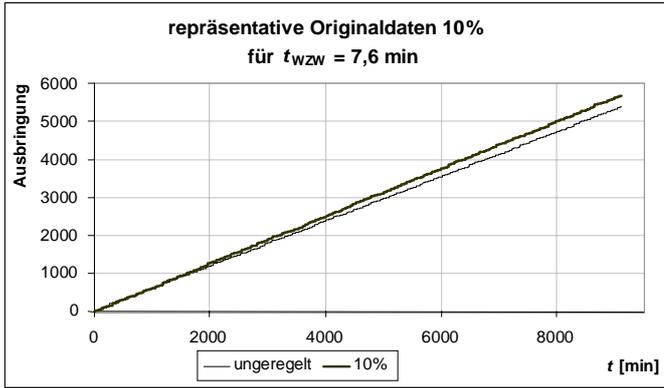
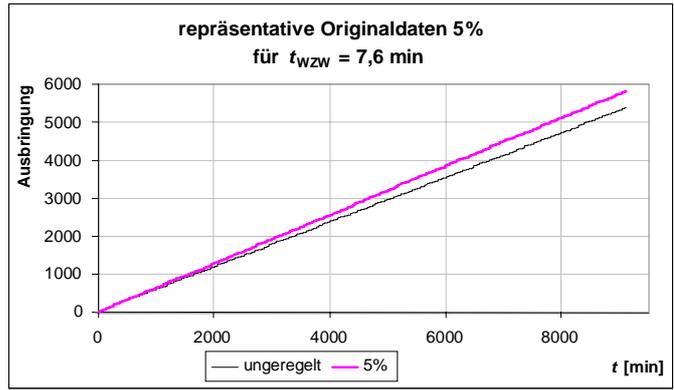
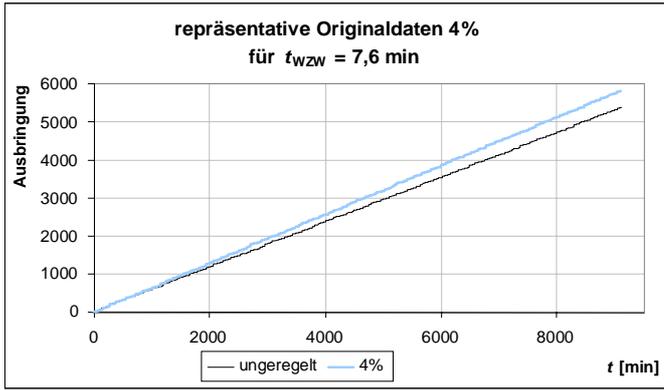
Werkzeugwechsel-Zeit: LN(10; 2)-verteilt





Werkzeugwechsel-Zeit: 7,6 min.





Werkzeugwechsel-Zeit: 3,5 min

