

Vergleich der Wirtschaftlichkeit verschiedener Fertigungsmethoden

**Beispiel: Werkstattfertigung und CNC-Fertigung von 2 Bauteilen
eines Bienenkastens (Warré-Beute)**

Belegarbeit im Lehrfach Fabrikplanung, Bachelor-Studiengang Holztechnik

Eberswalde Wintersemester 2013/2014

(Fertiggestellt: Februar 2014)

Schleiter, Adrian

Weinert, Jonathan Matthias

Betreuer: Prof. Klaus Dreiner

Inhalt

	Seite
0 - Einleitung	3
1 - Beschreibung der Technologien	5
1.1 - Werkstattfertigung	5
1.2 - CNC-Fertigung	5
2 - Zeitaufnahme	6
2.1 - Werkstattfertigung	6
3 - Stückkostenfunktionen	11
3.1 - Allgemein	11
3.2 - Bauteil 1	12
3.3 - Bauteil 2	14
4 - Fazit	16
Anhang	17
Stückkosten-Tabellen	17
Bildquellen	19

0 - Einleitung

Dieses Projekt mit seinem ungewöhnlichen Beispiel ist mit einem anderen Projekt eng verbunden, welches wir, gemeinsam mit unserem Kommilitonen Tom Schubert, unter der Betreuung von Herrn Prof. Alexander Pfriem bearbeiten. Jenes ist unser „Ingenieurtechnisches Projekt“, welches als Voraussetzung für die Anmeldung der Bachelorarbeit absolviert werden muss. Dabei geht es darum, sechs Bienenkästen (zwei verschiedene Bauarten, teilweise aus Thermoholz, teilweise aus nativem Holz) herzustellen, welche der Imker-AG unserer Hochschule zu Nutzung überlassen werden. Ziel dabei ist es erstens, die Zweckmäßigkeit des Einsatzes von Thermoholz in dieser wirtschaftlichen Nische zu erproben, und zweitens, Möglichkeiten des konstruktiven Holzschutzes in die Herstellung von Beuten (Fachterminus für Bienenkästen) zu integrieren.

Da also ohnehin eine mittelgroße Anzahl verschiedener Teile zu fertigen war, bot es sich an, in unserer Belegarbeit im Lehrfach Fabrikplanung diese Fertigung für Untersuchungen zu nutzen. So ergab sich die Idee, für ausgewählte Teile zwei Fertigungsverfahren unter Betrachtung der Wirtschaftlichkeit zu vergleichen. Unsere Wahl fiel dabei auf die herkömmliche Werkstattfertigung und die Fertigung mit einem CNC-Bearbeitungszentrum.

Die beiden betrachteten Teile gehören zur sogenannten Warré-Beute (Abbildung 1), einem Bienenkasten für die besonders naturnahe Bienenhaltung. Diese Beute besteht aus einem Boden, einer speziellen Dachkonstruktion, sowie je nach Größe des Bienenvolkes zwei bis vier sogenannten Zargen. Diese beinhalten später die Waben. Sie bestehen jeweils aus vier Brettern, zwei Griffen und acht Leisten (=Oberträgern), an denen die Bienen Ihre Waben befestigen (Abbildung 2).



Abbildung 1: Warré-Beute mit 2 Zargen im Einsatz



Abbildung 2: Eine der im Rahmen des Bienenkastenprojektes hergestellten Warré-Zargen aus nativem Holz, bestückt mit 4 von insgesamt 8 Oberträgern

Inhalt dieser Projektarbeit ist nun der Vergleich der beiden oben genannten Fertigungsverfahren für die vier Wände bzw. Seitenbretter der Zargen. Die jeweils gegenüberliegenden Bretter sind identisch, sodass sich zwei verschiedene Typen von Bauteilen ergeben. Kennzeichnend ist, dass die Teile, an

welchen die acht Leisten befestigt werden sollen (Bauteil 2) einen Falz von 10mm x 10mm haben. Anders als bei den handelsüblichen Warré-Zargen erhalten diese Teile in unserer Herstellung eine schmale Fase, um Wasseransammlungen zwischen den Zargen zu vermeiden. Die anderen Teile (Bauteil 1) können, da sie keinen Falz benötigen, sogar mit einer größeren Fase und an der Unterseite mit einer Abtropfkante versehen werden. Außerdem erhalten sie an jeder Seite 3 Bohrungen mit einem Durchmesser von 4mm zur Verschraubung der Elemente. In Abbildung 3 sind die Bauteile als Skizze dargestellt.

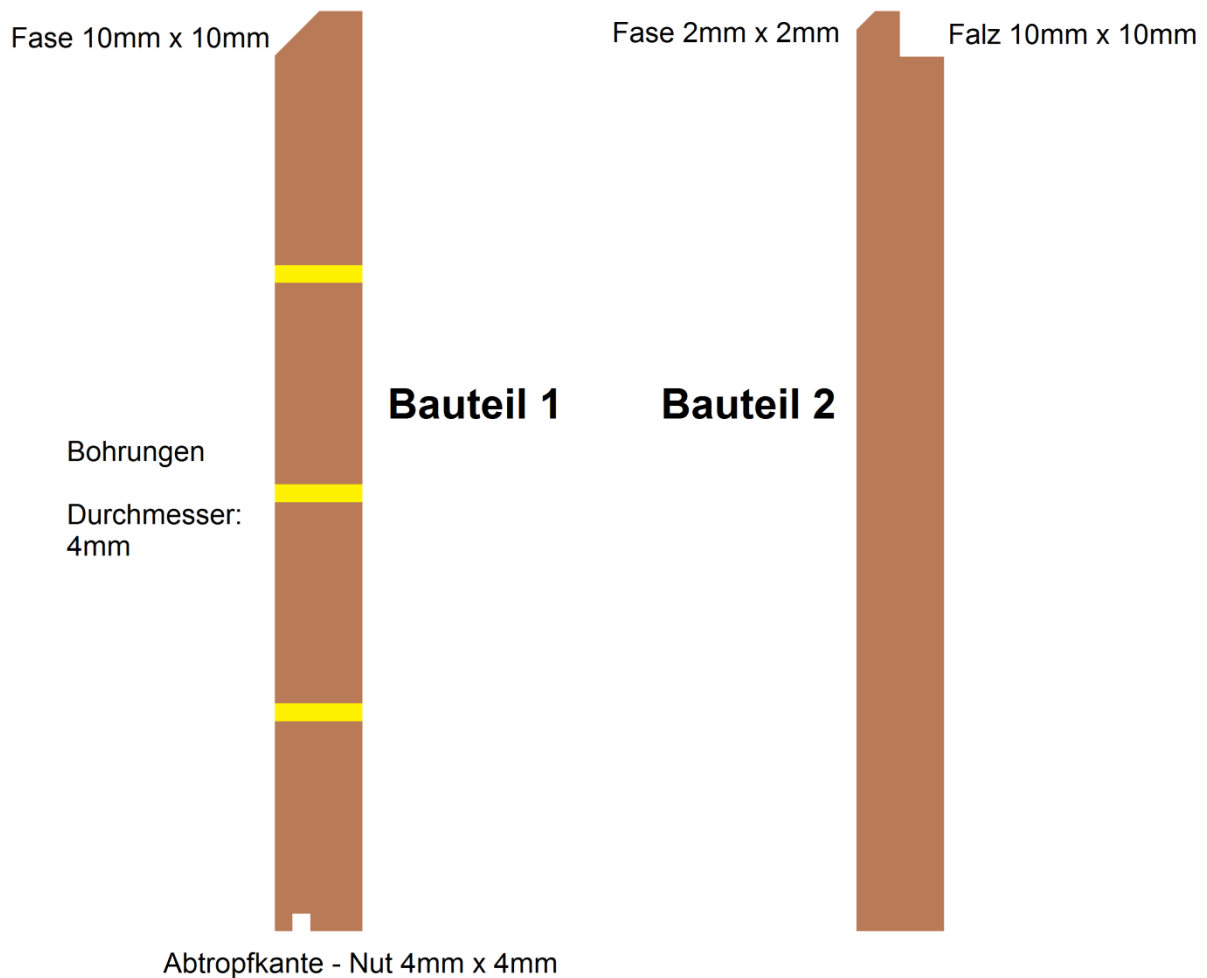


Abbildung 3: Skizze der beiden Bauteiltypen

1 - Beschreibung der Technologien

1.2 - Werkstattfertigung

Es wurden jeweils zwei identische Bauteile aus Rohlingen gefertigt, welche in der Stärke (20mm) und der Breite (210mm) den Endmaßen entsprachen.

Für Bauteil 1 wurden folgende Arbeitsschritte in folgender Reihenfolge durchgeführt:

- Nut fräsen (Abtropfkante) - Tischfräse
- Fase hobeln - Abrichthobelmaschine
- Ablängen - Formatkreissäge
- Bohren - Ständerbohrmaschine

Für Bauteil 2 wurden folgende Arbeitsschritte in folgender Reihenfolge durchgeführt:

- Fase hobeln - Abrichthobelmaschine
- Falz fräsen - Tischfräse
- Ablängen - Formatkreissäge

Die Werkstattfertigung wurde in der Tischlerei der Fachbereiches Holztechnik der HNE Eberswalde durchgeführt. Diese Tischlerei entspricht in der Ausstattung und Einrichtung einer gut organisierten Tischlerei in der freien Wirtschaft. In der industriellen Fertigung wäre es denkbar, die Maschinenaufstellung zu optimieren (Vorgehensweise → Dreieckverfahren nach Schmigalla), da in der Mitte zwischen allen benutzten Maschinen die ungenutzte Dickenhobelmaschine steht und außerdem der Weg von der Formatkreissäge zur Ständerbohrmaschine vergleichsweise lang ist. Für eine übliche Fertigung in einer Tischlerei mit verschiedenartigen Aufträgen ist eine solche Maschinenaufstellung aber vergleichbar, da die Werkstatt nicht für jeden Auftrag umgeräumt werden kann.

1.2 - CNC-Fertigung

Die CNC-Fertigung erfolgte im Technikum des Fachbereiches an einem Bearbeitungszentrum der Firma Biesse. Da nicht für alle Arbeitsgänge passende Werkzeuge vorhanden waren, wurden die Arbeitsgänge Nut fräsen (Bauteil 1) sowie Fase fräsen (Bauteil 1 und 2) durch vorbeifahren vergleichbarer Werkzeuge simuliert. Im Voraus mussten die Bauteile am Computer konstruiert und die Konstruktion in ein CNC-Programm überführt werden, was ein Student eines höheren Semesters und ein wissenschaftlicher Mitarbeiter des Fachbereiches freundlicherweise für uns übernahmen.

Der Ablauf der Fertigung war folgendermaßen:

Bauteil 1: Nut fräsen (Simulation), Fase fräsen (Simulation), Bohren, Ablängen

Bauteil 2: Falz fräsen, Bauteil wenden, Fase fräsen (Simulation), Ablängen

Besonderheit: Bauteil 2 musste gewendet werden, da die flach liegenden Teile nur von oben bearbeitet werden können.

2 - Zeitaufnahme

2.1 - Werkstattfertigung

Am Freitag, dem 10. Januar 2014 wurden die Zeitaufnahmen für die Werkstattfertigung durchgeführt. Die Arbeit führte Jonathan Weinert aus, Adrian Schleiter ermittelte die Zeiten.

Die Zeitaufnahme für Bauteil 1 ergab folgende Ergebnisse:

Nr.	Ablaufabschnitt / Messpunkt	Bezugsmenge	Zy mz	1	2	3	4	5	6	L ti	$t = \frac{L}{100} \cdot ti$	Zeit art
1	Fräse rüsten		R							80	275,5	tMN
			L	80						344,39		
	Einschalten der Maschine		F	344								
2	Abtropfkante fräsen	2	R							88,3333	21,3	tMH
			L	90	90	85				24,075		
	Ablegen des Bauteils		F	367	390	417						
3	Wagen zur Abrichte bringen		R							100	96,5	tMN
	Abrichte rüsten		L	100						96,465		
	grünen Knopf betätigen		F	513								
4	Fase anhebeln (Abrichte)	2	R							100	88,1	tMH
			L	100	100	100				88,1017		
	Ablegen des Bauteils		F	626	712	777						
5	Transport zur Kreissäge		R							80	203,6	tMN
	Kreissäge rüsten		L	80						254,495		
	Einschalten der Maschine		F	1032								
6	Ablängen	2	R							96,6667	69,9	tMH
			L	90	100	100				72,3333		
	Ablegen der Bauteile		F	1119	1187	1249						
7	Transport zur Bohrmaschine		R							100	102,3	tMN
	Bohrmaschine rüsten		L	100						102,307		
	Einschalten der Maschine		F	1351								
8	Bohren	1	R							98,3333	153,6	tMH
			L	90	100	90	110	100	100	156,167		
	Ablegen des Bauteils		F	1543	1691	1877	1993	2145	2288			

Es handelt sich hier um eine etwas modifizierte/vereinfachte REFA-Zeitaufnahme-Tabelle. Links sind in Fettschrift die verschiedenen Tätigkeiten bzw. Ablaufabschnitte aufgeführt, in normaler Schrift ist jeweils vermerkt, womit der jeweilige Abschnitt endet. In dem Moment, wo dieses Ereignis eintritt, vermerkt der Zeitnehmer die Zeit und der nächste Ablaufabschnitt beginnt automatisch.

In der letzten Spalte ist die Zeitart vermerkt. In unserem Beispiel werden nur zwei Zeitarten unterschieden: die Zeit der Haupttätigkeit tMH (sie umfasst alles, was planmäßig stattfindet und unmittelbar zum Arbeitsfortschritt führt) sowie die Zeit der Nebentätigkeit tMN (sie umfasst notwendige und planmäßige Tätigkeiten, die nur indirekt zum Arbeitsfortschritt beitragen). Unter die Kategorie tMN fallen in diesem Beispiel alle Rüstzeiten, unter tMH die Zeiten, in denen die Werkstücke an den Maschinen bearbeitet werden.

Für alle Ablaufabschnitte der Zeitart tMH gibt es einen Eintrag in der Spalte „Bezugsmenge“. Da aus einem Rohling immer zwei Fertigteile werden, und bis zum Ablängen die Rohlinge als Ganzes bearbeitet werden, bezieht sich eine Zeitmessung für das Fräsen der Abtropfkante, das Anhebeln der

Fase sowie das Ablängen jeweils auf 2 Fertigteile, das Bohren jedoch immer nur auf ein Fertigteil, da die beiden Teile zu diesem Zeitpunkt schon getrennt sind und einzeln bearbeitet werden.

Im mittleren Bereich der Tabelle sind die Zeitmessungen dokumentiert. Sie werden in Hundertstelminuten (HM) angegeben und sind in unserem Fall am Computer mittels eines Makros in eine Excel-Tabelle eingefügt worden. Die (in diesem Beispiel) blau hinterlegten Felder geben die Fortschrittszeit an, d.h. die Zeit, welche vom Beginn der Zeitaufnahme bis zum Abschluss des entsprechenden Abschnittes verfließen ist. An der Fortschrittszeit kann im Zweifelsfall die Abfolge der einzelnen Abschnitte nachvollzogen werden. In unserem Beispiel ist das sehr einfach, da jeder Abschnitt ein oder mehrere Male durchgeführt wurde und anschließend zum nächsten Abschnitt übergegangen wurde. Es kann jedoch auch vorkommen, dass ablaufbedingt oder aufgrund schlechter Organisation zwischen den Abschnitten hin- und hergesprungen wird.

Die jeweils darüber liegenden Felder (gelb hinterlegt), stellen die Einzelzeit dar, also jene Zeit, die vom Ende des vorangegangenen Abschnittes (=Beginn des aktuellen Abschnittes), bis zum Ende des aktuellen Abschnittes vergangen ist. Darüber ist noch der sogenannte Leistungsgrad angegeben. Dieser hat einen Standardwert von hundert, was eine durchschnittliche Ausführung der Arbeit darstellen würde. Wird die Arbeit in besonderem Maße zügig ausgeführt, erhöht sich der Leistungsgrad, geht die Arbeit stockend voran, verringert er sich. Die Einteilung erfolgt durch den Zeitnehmer, der dazu den ganzen Bewegungsablauf des Arbeiters sorgfältig beobachten muss. Da wir mit den Maschinen weniger vertraut sind, als es eine eingeübte Fachkraft es wäre, haben wir für das Rüsten der Tischfräse und der Kreissäge sowie für die Arbeit an der Tischfräse den Leistungsgrad generell etwas niedriger angesetzt.

In der hellrot hinterlegten Spalte sind die Mittelwerte für die Einzelzeiten und Leistungsgrade der jeweiligen Ablaufabschnitte notiert. Aus diesen werden Soll-Zeiten ermittelt, indem die ermittelten Einzelzeiten auf einen Leistungsgrad von 100 umgerechnet werden:

$$t = \frac{\bar{L}}{100} \times \bar{t}_i$$

Die Soll-Zeit wird auf eine Nachkommastelle gerundet angegeben. Es ergibt sich aus den Abschnitten der Zeitart tMH (Haupttätigkeit) für jedes Bauteil ein losvariabler Zeitanteil (Bearbeitungszeit):

$$\begin{aligned} t_{\text{Bearbeiten}} &= \frac{t_2 + t_4 + t_6}{2} + t_8 = \frac{21,3 \text{ HM} + 88,1 \text{ HM} + 69,9 \text{ HM}}{2} + 153,6 \text{ HM} \\ &= 243,25 \text{ HM} \approx 2,43 \text{ min} \end{aligned}$$

Für den ganzen Arbeitsablauf ergibt sich aus den Rüstzeiten (Zeitart tMN) ein losfixer Anteil:

$$\begin{aligned} t_{\text{Rüsten}} &= t_1 + t_3 + t_5 + t_7 = 275,5 \text{ HM} + 96,5 \text{ HM} + 203,6 \text{ HM} + 102,3 \text{ HM} \\ &= 677,9 \text{ HM} \approx 6,78 \text{ min} \end{aligned}$$

Die Zeitaufnahme für Bauteil 2 ergab folgende Ergebnisse (Hervorhebungen analog zur Zeitaufnahme für Bauteil 1):

Nr.	Ablaufabschnitt / Messpunkt	Bezugsmenge	Zy mz	1	2	3	L ti	$t = \frac{L}{100} \cdot ti$	Zeit art	
1	Abrichte rüsten		R				100	59,1	tmN	
			L	100						59,0517
			ti	59,1						
	Maschine einschalten		F	59,1						
2	Fase anhebeln	2	R				95	51,9	tmH	
			L	85	100	100				54,6344
			ti	74,5	43,8	45,6				
	Bauteil abgeben		F	134	177	223				
3	Transport zur Fräse		R				80	213,3	tmN	
	Fräse rüsten		L	80						266,577
			ti	267						
	Maschine einschalten		F	490						
4	Falz fräsen	2	R				90	20,9	tmH	
			L	90	90	90				23,2006
			ti	23	21,9	24,7				
	Bauteil ablegen		F	513	534	559				
5	Transport zur Formatsäge		R				90	130,6	tmN	
	Formatsäge rüsten		L	90						145,067
			ti	145						
	Maschine einschalten		F	704						
6	Ablängen	2	R				96,6667	63,4	tmH	
			L	110	90	90				65,6356
			ti	49,5	77,2	70,2				
	Bauteile ablegen		F	754	831	901				

Der losvariable Zeitanteil (Bearbeitungszeit) beträgt hier:

$$t_{\text{Bearbeiten}} = \frac{t_2 + t_4 + t_6}{2} = \frac{51,9 \text{ HM} + 20,9 \text{ HM} + 63,4 \text{ HM}}{2} = 68,1 \text{ HM} \approx 0,68 \text{ min}$$

Der losfixe Zeitanteil (Rüstzeit) beträgt:

$$t_{\text{Rüsten}} = t_1 + t_3 + t_5 = 59,1 \text{ HM} + 213,3 \text{ HM} + 130,6 \text{ HM} = 403 \text{ HM} = 4,03 \text{ min}$$

Variante 2 für die Werkstattfertigung:

Für das Anhebeln der Fase wird bei beiden Bauteilen sehr viel Zeit benötigt. Möglicherweise ist es zweckmäßiger, darauf zu verzichten und stattdessen die Fase zu fräsen. Hier können aufgrund der Ähnlichkeit der Arbeitsgänge die Werte der Ablaufabschnitte 1 und 2 von Bauteil 1 verwendet werden. Es ergeben sich:

$$\text{Für Bauteil 1: } t_{\text{Bearbeiten}} = \frac{2 \times t_2 + t_6}{2} + t_8 = \frac{2 \times 21,3 \text{ HM} + 69,9 \text{ HM}}{2} + 153,6 \text{ HM} = 209,9 \text{ HM} \approx 2,1 \text{ min}$$

$$t_{\text{Rüsten}} = 2 \times t_1 + t_5 + t_7 = 2 \times 275,5 \text{ HM} + 203,6 \text{ HM} + 102,3 \text{ HM} = 856,9 \text{ HM} \approx 8,57 \text{ min}$$

$$\text{Für Bauteil 2: } t_{\text{Bearbeiten}} = \frac{t_{2BT1} + t_4 + t_6}{2} = \frac{21,3 \text{ HM} + 20,9 \text{ HM} + 63,4 \text{ HM}}{2} = 52,8 \text{ HM} \approx 0,53 \text{ min}$$

$$t_{\text{Rüsten}} = t_{1BT1} + t_3 + t_5 = 275,5 \text{ HM} + 213,3 \text{ HM} + 130,6 \text{ HM} = 619,4 \text{ HM} \approx 6,19 \text{ min}$$

2.2 - CNC-Fertigung

Die Zeitaufnahme für die CNC-Fertigung fand am Montag, dem 20. Januar 2014 statt. Ein Mitarbeiter der Hochschule, bediente das Bearbeitungszentrum, während Jonathan Weinert die Zeiten aufnahm.

Folgende Zeitaufnahme resultierte daraus:

Nr.	Ablaufabschnitt / Messpunkt	Bezugsmenge	Zy	1	2	3	4	5	6	7	8	9
			mz									
1	Maschine beschicken	2	R									
			L	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	ti		31	26	21	29	29	154	43	38	23	
	F		31	521	835	1099	1372	1780	2152	2432	2710	
2	Fertigung	2	R									
			L									
	ti		464	293	235	244	254	329	242	255	249	
	F		495	814	1070	1343	1626	2109	2394	2687	2959	

Diese Zeitaufnahme umfasst sowohl Bauteil 1 (Einzelzeiten gelb hinterlegt) als auch Bauteil 2 (Einzelzeiten rot hinterlegt). Der hellrot hinterlegte Bereich gehört ebenfalls zur Fertigung von Bauteil 2, jedoch trat hier eine Maschinenstörung auf, sodass diese Werte nicht mit ausgewertet werden können.

In Ablaufabschnitt 2 fehlen die Leistungsgrade, da dieser Ablaufabschnitt vollständig von der Maschine durchgeführt wird. Aufgrund der Einfachheit der Tätigkeit des Beschickens sind in Ablaufabschnitt 1 keine Unterscheidungen im Leistungsgrad gemacht worden.

Eine weitere Besonderheit ist, dass bei der CNC-Fertigung keine klare Grenze zwischen Rüst- und Bearbeitungszeit existiert, da die Maschine sich während der Fertigung ständig selbst umrüstet. Wenn ein neues Teil geladen wird, benötigt die Anlage etwas mehr Zeit, das ist im Zyklus 1, Ablaufabschnitt 2 ersichtlich – deshalb ist das Feld für die entsprechende Einzelzeit etwas dunkler hinterlegt. Diese Zeit muss gesondert betrachtet werden.

Da hier für beide Bauteile dieselben Ablaufabschnitte vorliegen und es nicht sinnvoll wäre, globale Mittelwerte zu bilden, haben wir hier auch die hinteren Spalten weggelassen. Deshalb errechnen wir nun die entsprechenden Werte für beide Teile einzeln.

Bauteil 1:

$$\text{Beschicken: } \bar{t}_1 = \frac{31 \text{ HM} + 26 \text{ HM} + 21 \text{ HM} + 29 \text{ HM} + 29 \text{ HM}}{5} = 27,1 \text{ HM}$$

$$\text{Fertigen: } \bar{t}_2 = \frac{293 \text{ HM} + 235 \text{ HM} + 244 \text{ HM} + 254 \text{ HM}}{4} = 256,5 \text{ HM} \quad (\text{Zyklus 1 nicht betrachtet})$$

Bauteil 2:

$$\text{Beschicken: } \bar{t}_1 = \frac{43 \text{ HM} + 38 \text{ HM} + 23 \text{ HM}}{3} = 34,6 \text{ HM}$$

$$\text{Fertigen: } \bar{t}_2 = \frac{242 \text{ HM} + 255 \text{ HM} + 249 \text{ HM}}{3} = 248,8 \text{ HM}$$

Der losvariable Zeitanteil bei Bauteil 1 beträgt also im Mittel 283,6 HM ($\approx 2,84$ min), bei Bauteil 2 beträgt er 283,4 HM ($\approx 2,83$ min).

Den losfixen Zeitanteil, der einmal pro Schicht hinzukommt, können wir aus der Differenz zwischen dem gemittelten t_2 des Bauteils 1 sowie dem t_2 aus Zyklus 1 abschätzen:

$$t_{unabh.} = t_{2,Zyklus1} - \bar{t}_2 = 464 \text{ HM} - 256,5 \text{ HM} = 207,5 \text{ HM} \approx 2,08 \text{ min}$$

Bei der CNC-Fertigung kommt jedoch einmalig ein gewisser Aufwand für die Arbeitsvorbereitung zustande. Die dafür benötigte Zeit betrug ca. 40 min (10 min Konstruktion in Solid Works, 30 min für die Umsetzung in ein CNC-Programm). Es entfallen davon je 20 min auf die beiden Bauteile.

Variante 2 für die CNC-Fertigung

Auch bei der CNC-Fertigung ist eine Variation möglich, und zwar die wechselnde Beschickung. Das bedeutet, dass die Maschine auf einer Seite arbeitet und zeitgleich auf der anderen beschickt wird. Damit lässt sich die Produktivität erhöhen, da der losvariable Zeitanteil sich auf die reine Fertigungszeit beschränkt.

3 - Stückkostenfunktionen

3.1 - Allgemein

Um festzustellen, welche Fertigungstechnologie bei welcher Stückzahl die wirtschaftlichere ist, müssen die Zeitdaten mit den Stundensätzen von Arbeitern als auch Maschinen verrechnet werden, um die konkreten Stückkosten zu ermitteln. Dazu werden Stückkostenfunktionen aufgestellt.

Grundsätzlich setzen sich die Kosten folgendermaßen zusammen:

$$K = \text{losfixe Kosten} + \text{losvariable Kosten}$$

Die Stückkosten werden dann folgendermaßen ermittelt:

$$k = \frac{\text{losfixe Kosten} + \text{losvariable Kosten}}{\text{Losgröße}}$$

Die Fixkosten setzen sich wiederum zusammen aus den Kosten für die Arbeitsvorbereitung und den Kosten für das Rüsten der Maschinen (bei der CNC-Fertigung sind die losfixen Rüstkosten diejenigen, die aus dem losfixen Zeitanteil entstehen).

Für die Werkstattfertigung entfallen die Kosten für die Arbeitsvorbereitung weitestgehend.

Für alle weiteren Betrachtungen treffen wir an dieser Stelle die Festlegung, dass in 8h-Schichten gearbeitet wird. Dadurch fallen die Kosten für das Rüsten der Maschinen je angefangene 8 Stunden (480 Minuten) Arbeitszeit neu an.

Folgende Stundensätze werden angenommen:

Mitarbeiter:	50 EUR
CNC-Maschine:	65 EUR
Tischfräse:	17 EUR
Sonstige Maschinen:	12 EUR

3.2 - Bauteil 1

Werkstattfertigung Variante 1

Bei einer Schichtlänge von 480 min und einer Gesamtrüstzeit von 6,78 min bleiben für die eigentliche Fertigung (ungeachtet der Verteilzeiten) 473,22 min. Bei einer Bearbeitungszeit von 2,43 min pro Stück können somit in einer Schicht maximal 194 Teile gefertigt werden → maximale Losgröße.

Von den 6,78 min losfixe Gesamtrüstzeit fallen rund 2,76 min auf die Tischfräse mit einem Stundensatz von 17 EUR, die restlichen 4,02 min auf die übrigen Maschinen mit Stundensätzen von 12 EUR. Von den 2,43 min Bearbeitungszeit pro Stück entfallen rund 0,11 min auf die Tischfräse, die übrigen 2,32 min auf die anderen Maschinen. Es ergibt sich eine Stückkostenfunktion (x ...Stückzahl; s ...Schichten):

$$k = [s \times [2,76 \text{ min} \times \left(\frac{17 \text{ EUR}}{60 \text{ min}} + \frac{50 \text{ EUR}}{60 \text{ min}}\right) + 4,02 \times \left(\frac{12 \text{ EUR}}{60 \text{ min}} + \frac{50 \text{ EUR}}{60 \text{ min}}\right)] + x \times [0,11 \text{ min} \times \left(\frac{17 \text{ EUR}}{60 \text{ min}} + \frac{50 \text{ EUR}}{60 \text{ min}}\right) + 2,32 \text{ min} \times \left(\frac{12 \text{ EUR}}{60 \text{ min}} + \frac{50 \text{ EUR}}{60 \text{ min}}\right)] \times x^{-1}$$

Vereinfacht:

$$k = [(s \times 2,76 \text{ min} + x \times 0,11 \text{ min}) \times \frac{67 \text{ EUR}}{60 \text{ min}} + (s \times 4,02 \text{ min} + x \times 2,32 \text{ min}) \times \frac{62 \text{ EUR}}{60 \text{ min}}] \times x^{-1}$$

Werkstattfertigung Variante 2

Analog zur Variante 1 ergibt sich:

Rüstzeit (losfix): Tischfräse: 5,51 min sonstige M.: 3,06 min

Bearbeitungszeit (p. Stück.): Tischfräse: 0,21 min sonstige M.: 1,89 min

Damit ergibt sich folgende Stückkostenfunktion:

$$k = [(s \times 5,51 \text{ min} + x \times 0,21 \text{ min}) \times \frac{67 \text{ EUR}}{60 \text{ min}} + (s \times 3,06 \text{ min} + x \times 1,89 \text{ min}) \times \frac{62 \text{ EUR}}{60 \text{ min}}] \times x^{-1}$$

Pro Schicht entfallen 8,57min auf das Rüsten der Maschinen, zum Bearbeiten bleiben somit 471,43min. In dieser Zeit können bei einer Bearbeitungszeit von 2,1min pro Stück maximal 224 Teile gefertigt werden.

CNC-Fertigung Variante 1

Hier ist die Rechnung leichter, da über die ganze Arbeitszeit nur ein Maschinensatz relevant ist:

$$k = \left[20 \text{ min} \times \frac{50 \text{ EUR}}{60 \text{ min}} + (s \times 2,08 \text{ min} + 2,84 \text{ min} \times x) \times \frac{50 \text{ EUR} + 65 \text{ EUR}}{60 \text{ min}} \right] \times x^{-1}$$

Bei einer losfixen Rüstzeit von 2,08min bleiben 477,92 min für die Fertigung. In dieser Zeit können maximal 168 Teile gefertigt werden.

CNC-Fertigung Variante 2

Bei der zweiten Variante der CNC-Fertigung ändert sich in der Stückkostenfunktion lediglich die Bearbeitungszeit:

$$k = \left[20 \text{ min} \times \frac{50 \text{ EUR}}{60 \text{ min}} + (s \times 2,08 \text{ min} + 2,57 \text{ min} \times x) \times \frac{50 \text{ EUR} + 65 \text{ EUR}}{60 \text{ min}} \right] \times x^{-1}$$

In den 477,92 min, die für die Fertigung zur Verfügung stehen, können in dieser Variante 184 Teile gefertigt werden.

Das Diagramm in Abbildung 4 zeigt die Stückkostenfunktionen der verschiedenen Fertigungsvarianten im Vergleich. Es ist ersichtlich, dass die Varianten der Werkstattfertigung (mit Stückkosten von 2,23 EUR bzw. 2,56 EUR nach drei Schichten) erheblich kostengünstiger sind, als die Varianten der CNC-Fertigung (mit Stückkosten von 4,98 EUR bzw. 5,50 EUR nach ebenfalls drei Schichten). Ab 8 Stück ist die Variante 2 der Werkstattfertigung die günstigste Alternative.

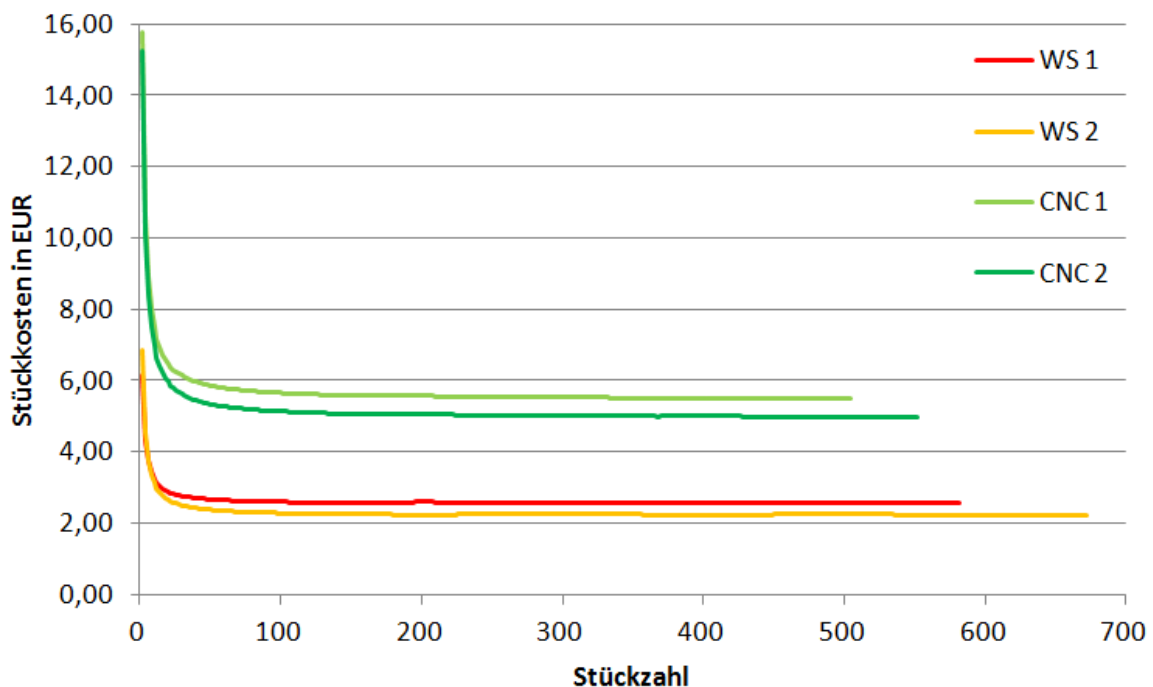


Abbildung 4: Dieses Diagramm zeigt die Stückkostenfunktionen der vier Fertigungsvarianten für Bauteil 1 über drei Schichten. Die beiden Varianten der Werkstattfertigung ermöglichen die Produktion größerer Mengen zu niedrigeren Stückkosten.

3.3 - Bauteil 2

Werkstattfertigung Variante 1

Bei einer Schichtlänge von 480 min und einer losfixen Gesamtrüstzeit von 4,03 min bleiben für die eigentliche Fertigung 475,97 min. Bei einer Bearbeitungszeit von 0,68 min pro Stück können somit in einer Schicht maximal 698 Teile gefertigt werden.

Die Zeiten verteilen sich folgendermaßen auf die Maschinen:

Rüstzeit (losfix): Tischfräse: 2,13 min sonstige M.: 1,90 min

Bearbeitungszeit (p. Stück): Tischfräse: 0,10 min sonstige M.: 0,58 min

Es ergibt sich folgende Stückkostenfunktion:

$$k = [(s \times 2,13 \text{ min} + x \times 0,10 \text{ min}) \times \frac{67 \text{ EUR}}{60 \text{ min}} + (s \times 1,90 \text{ min} + x \times 0,58 \text{ min}) \times \frac{62 \text{ EUR}}{60 \text{ min}}] \times x^{-1}$$

Werkstattfertigung Variante 2:

Die Maschinen Belegung ist zusammengesetzt aus:

Rüstzeit (losfix): Tischfräse: 4,88 min Formatsäge: 1,31 min

Bearbeitungszeit (p. Stück.): Tischfräse: 0,21 min Formatsäge: 0,32 min

Damit ergibt sich folgende Stückkostenfunktion:

$$k = [(s \times 4,88 \text{ min} + x \times 0,21 \text{ min}) \times \frac{67 \text{ EUR}}{60 \text{ min}} + (s \times 1,31 \text{ min} + x \times 0,32 \text{ min}) \times \frac{62 \text{ EUR}}{60 \text{ min}}] \times x^{-1}$$

Pro Schicht entfallen 6,19 min auf das Rüsten der Maschinen (losfix), zum Bearbeiten bleiben somit 473,81min. In dieser Zeit können bei einer Bearbeitungszeit von 0,53min pro Stück maximal 892 Teile gefertigt werden.

CNC-Fertigung Variante 1:

Die Zeit für die Arbeitsvorbereitung sowie losfixe Rüstzeit entsprechen den Werten für Bauteil 1. Lediglich der Wert für den losvariablen Zeitanteil muss angepasst werden:

$$k = [20 \text{ min} \times \frac{50 \text{ EUR}}{60 \text{ min}} + (s \times 2,08 \text{ min} + 2,83 \text{ min} \times x) \times \frac{50 \text{ EUR} + 65 \text{ EUR}}{60 \text{ min}}] \times x^{-1}$$

Bei dieser Konstellation können je Schicht 168 Teile gefertigt werden (wie bei Bauteil 1).

CNC-Fertigung Variante 2:

Hier muss wiederum für den losvariablen Zeitanteil die Fertigungszeit pro Stück eingesetzt werden:

$$k = \left[20 \text{ min} \times \frac{50 \text{ EUR}}{60 \text{ min}} + (s \times 2,08 \text{ min} + 2,49 \text{ min} \times x) \times \frac{50 \text{ EUR} + 65 \text{ EUR}}{60 \text{ min}} \right] \times x^{-1}$$

Es können 190 Teile pro Schicht gefertigt werden.

Wie aus dem Diagramm in Abbildung 5 ersichtlich ist, ist der Kostenunterschied zwischen der CNC-Fertigung und der Werkstattfertigung bei Bauteil 2 noch ausgeprägter. Während der Unterschied zwischen den beiden Varianten der Werkstattfertigung mit maximal 0,15 EUR pro Stück kleiner ist, als bei Bauteil 1, ist der Unterschied zwischen den beiden CNC-Varianten etwas größer. Nach jeweils zwei Schichten beziffern sich die Stückkosten bei der Werkstattfertigung auf 0,72 EUR (Var. 1) bzw. 0,57 EUR (Var. 2), bei der CNC-Fertigung auf 5,50 EUR (Var. 1) bzw. 4,84 EUR (Var. 2). Ab einer Stückzahl von 18 ist die Variante 2 der Werkstattfertigung die preiswerteste Option.

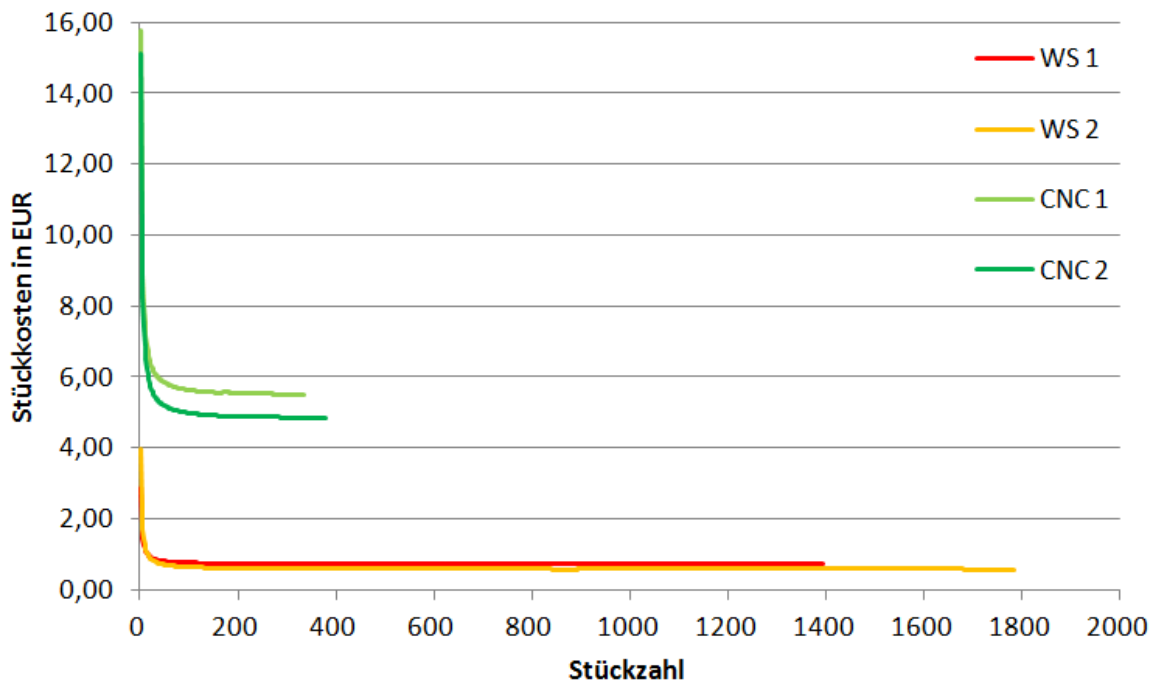


Abbildung 5: Das Diagramm stellt Stückkostenfunktionen der vier Varianten zur Fertigung von Bauteil 2 über jeweils zwei Schichten dar. Die Unterschiede zwischen Werkstatt- und CNC-Fertigung in der Produktionsmenge pro Schicht sowie den Stückkosten sind hier noch wesentlich größer als bei Bauteil 1.

4 - Fazit

Aus dem Vergleich der Stückkostenfunktionen geht eindeutig hervor, dass die CNC-Fertigung unabhängig von der Produktionsmenge gegenüber der Werkstattfertigung bei den untersuchten Bauteilen nicht konkurrenzfähig ist. Der Unterschied zwischen den beiden Varianten der CNC-Fertigung (ein- und zweiseitige Beschickung) ist dabei nur gering.

Da die Beschickungszeit jedoch sehr gering ist, könnte in weitergehenden Betrachtungen geprüft werden, ob zumindest für Bauteil 1 die CNC-Fertigung wirtschaftlicher werden könnte, wenn eine Person mehrere Maschinen bestückt. Dies würde den Rahmen dieser Arbeit jedoch sprengen. Ebenso sind in den Varianten der Werkstattfertigung noch Optimierungen denkbar, z.B. eine Verbesserung in der Maschinenaufstellung oder eine Artteilung der Ablaufabschnitte zwischen mehreren Schichten, sodass die Rüstzeit je Schicht verkürzt wird. Weiterhin lassen sich die Maschinenstundensätze möglicherweise aufgrund der Einfachheit der Arbeitsgänge durch Auswahl sehr einfacher Geräte reduzieren. Dies alles soll hier nicht weiter verfolgt werden, soll aber darauf hinweisen, dass das Verbesserungspotential noch nicht ausgeschöpft ist.

Nicht betrachtet wurden mögliche Lagerkosten, die sich bekanntlich mit steigender Losgröße erhöhen.




Bei den Möglichkeiten der Werkstattfertigung ist Variante 2 im Allgemeinen die erste Wahl. Jedoch ist der Unterschied zu Variante 1 vergleichsweise gering, sodass in einer Fertigungsstätte, die mehrere Produkte herstellt, die Möglichkeit besteht, dass Variante 1 im Zusammenspiel mit der übrigen Produktion die bessere Option ist. Gründe dafür können z.B. Überlegungen hinsichtlich der Auslastung der einzelnen Maschinen sein.

Anhang



Stückkosten-Tabellen

Um die Ergebnisse der Stückkostenrechnungen nachvollziehbarer zu machen, folgen an dieser Stelle Auszüge aus den Wertetabellen.

Bauteil 1:

	WS 1	WS 2	CNC 1	CNC 2	
2	6,14	6,84	15,77	15,25	Schicht 1:
6	3,73	3,74	8,89	8,37	
8	3,42	3,35	8,03	7,51	
168	2,56	2,24	5,57	5,05	
170	2,56	2,24	5,59	5,05	Schicht 2:
184	2,56	2,24	5,58	5,04	
186	2,56	2,24	5,58	5,06	
194	2,56	2,24	5,57	5,05	
196	2,59	2,24	5,57	5,05	Schicht 3:
224	2,58	2,23	5,55	5,04	
226	2,58	2,27	5,55	5,03	
336	2,56	2,24	5,52	5,00	
338	2,56	2,24	5,53	5,00	
368	2,56	2,24	5,52	4,99	
370	2,56	2,24	5,52	5,00	
388	2,56	2,24	5,52	5,00	
390	2,58	2,24	5,52	5,00	
448	2,57	2,23	5,51	4,99	
450	2,57	2,25	5,51	4,99	
504	2,56	2,24	5,50	4,98	
552	2,56	2,24		4,98	
582	2,56	2,24			
672		2,23			

Bauteil 2:

	WS 1	WS 2	CNC 1	CNC 2	
2	2,88	3,97	15,75	15,10	Schicht 1:
16	0,98	0,99	6,72	6,06	
18	0,95	0,94	6,57	5,92	
168	0,74	0,61	5,55	4,90	
170	0,74	0,61	5,57	4,89	Schicht 2:
190	0,73	0,60	5,55	4,88	
192	0,73	0,60	5,55	4,90	
336	0,72	0,59	5,50	4,85	
338	0,72	0,59		4,85	
380	0,72	0,58		4,84	
382	0,72	0,58			
698	0,72	0,57			
700	0,72	0,57			
892	0,72	0,57			
894	0,72	0,58			
1396	0,72	0,57			
1398		0,57			
1784		0,57			

Bildquellen

- Abbildung 1 - <http://www.natuerliche-bienenhaltung.ch/photos/Warre%20mit%20neuem%20vereinfachten%20Dach.JPG>
- Abbildung 2 - Jonathan M. Weinert
- Abbildung 3 - Jonathan M. Weinert
- Abbildung 4 - Jonathan M. Weinert
- Abbildung 5 - Jonathan M. Weinert