

Cycle Time is Money

Profitability Comparison. Polymers for part production are selected according to technical and economic criteria, as well as design specifications. Differences in processing costs can lead to a situation where the manufacturing costs for a product made from expensive thermoplastics can work out lower than when using cheaper plastics. It can even be the case that polymers giving rise to higher unit costs nevertheless provide a better return on capital investment.

HANS-JOACHIM PITZ

Often, the only profitability criterion used in polymer selection is the comparative price per volume of different products. To make it possible to compare the profitability of polymers on a sound basis, BASF AG has developed a unit cost and return on capital investment comparison. Since this comparison is based on relative values, it can be carried out without the precise numerical data usually required for a cost calculation.

Translated from *Kunststoffe* 5/2003, pp. 41–46

Consequently, the comparison described is particularly suitable for material pre-selection in new projects.

Comparison of Different Types of Cost

A profitability comparison has to take into account all the costs that are relevant in the manufacture of a product. In Table 1, these costs are listed separately, broken down into material and production costs.

Material costs, including incidental costs, are dependent on component volume. Personnel costs, rental costs for the pro-

duction hall, machinery depreciation, power costs and, adopting a simplified assumption, also heating/cooling costs are essentially determined by the duration of the production process and therefore by cycle time. Mould costs on the other hand are dependent on the number of parts produced.

A simple cost comparison is, however, possible only if the costs used are either dependent on component volume or cycle time. This makes it necessary to adopt the simplified assumption that all production costs are proportional to cycle time, which can lead to error, chiefly in relation to

Cost key	
Cost types	dependent on
Material costs	
Raw material	component volume
Incidental material costs	component volume
Production costs	
Personnel	cycle time
Machine depreciation	cycle time
Production hall rent	cycle time
Power	cycle time
Heating/cooling	cycle time/polymer
Mould depreciation	number of parts to be produced

Table 1. Types of cost in injection moulding production

mould depreciation. However, given that this method of cost comparison is based on an estimation of cycle time, the error can be ignored.

The unit costs are calculated on the basis of the cost shares.

$$UC = MC + PC \quad (1)$$

where $MC = f(V)$ and $UC = f(t_{cool})$.

Comparison by Relative Values

At the time of product preselection, the data required to calculate unit costs are not yet available. To make a direct unit cost comparison to check whether material 2 with a higher volume price still might

material 2 should be the product with the higher volume price but shorter cycle times and therefore lower processing costs.

By transformation of inequation (2), we obtain a representation in which only known values that are simple to determine or estimate occur:

$$\frac{MC_{mat1}}{UC_{mat1}} < \frac{1 - \frac{PC_{mat2}}{PC_{mat1}}}{\frac{MC_{mat2}}{MC_{mat1}} - \frac{PC_{mat2}}{PC_{mat1}}} \quad (3)$$

If inequation (3) is fulfilled inequation (2) is also fulfilled. As a result, the unit costs of material 2 are lower. In this case, the material with the higher volume price is more favourable. The production and material cost ratios occurring in inequation (3) are discussed in the following sections.

Production Cost Ratio PC_{mat2}/PC_{mat1}

The production costs per unit of time and the number of units to be produced are assumed to be the same for both materials. Thus the production cost ratio is reduced to the ratio of cycle times, which are obtained from the sum of the cooling times plus non-productive times:

$$\frac{PC_{mat2}}{PC_{mat1}} = \frac{(t_{cool} + t_{non-prod})_{mat2}}{(t_{cool} + t_{non-prod})_{mat1}} \quad (4)$$

In the ideal situation, the ratio of the cycle times is known from a processing trial car-

$$\frac{PC_{mat2}}{PC_{mat1}} = \frac{s_{mat2}^2}{s_{mat1}^2} \cdot \frac{a_{eff\ mat1}}{a_{eff\ mat2}} \quad (5)$$

If materials with different mechanical properties are to be used for weight optimisation of the components, this must also be taken into account in the production cost ratio by different wall thicknesses for both products. Bearing in mind the quadratic influence of wall thickness on production costs, this savings potential should not be underestimated.

Material Cost Ratio MC_{mat2}/MC_{mat1}

The material costs MC are determined from the component volumes V, the material densities ρ and the prices P of the products. Thus we obtain for the material cost ratio:

$$\frac{MC_{mat2}}{MC_{mat1}} = \frac{V_{mat2} \cdot \rho_{mat2} \cdot P_{mat2}}{V_{mat1} \cdot \rho_{mat1} \cdot P_{mat1}} \quad (6)$$

To include rigidity and strength differences between the products being compared, the additional assumption must be made that the components have constant wall thickness. Thus the component area can be cancelled in equation (6), which simplifies to (7):

$$\frac{MC_{mat2}}{MC_{mat1}} = \frac{s_{mat2}}{s_{mat1}} \cdot \frac{\rho_{mat2}}{\rho_{mat1}} \cdot \frac{P_{mat2}}{P_{mat1}} \quad (7)$$

Effect of Strength on Component Costs

In equations (5) and (7) the wall thicknesses can be selected in accordance with the mechanical properties of the material. The wall thickness reduction possible with a material having higher strength and rigidity depends not only on material properties but also on the type of stress. To estimate this influence, the relationships shown in Table 2 apply.

Most components are subjected mainly to flexural stress. Therefore for profitability comparisons, two cases must be considered primarily:

- the same wall thickness, if this is necessary for design or production reasons, or
- the same flexural rigidity or strength, if changes in wall thickness are permissible.

Proportion of Unit Costs Accounted for by Material Costs

The proportion of unit costs accounted for by material costs depends on the complex-

Wall thicknesses

Table 2. Wall thickness ratios for the same component stress

	Tension/compression	Flexure
Equal rigidity	$\frac{s_1}{s_2} = \frac{E_2}{E_1}$	$\frac{s_1}{s_2} = 3\sqrt{\frac{E_2}{E_1}}$
Equal strength	$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\sigma_{2perm}}{\sigma_{1perm}}$	$\frac{s_1}{s_2} = \sqrt{\frac{\sigma_{2perm}}{\sigma_{1perm}}}$

work out more favourably than the cheaper material 1

$$UC_{mat2} < UC_{mat1} \quad (2)$$

is therefore not so easy. A solution to this problem is to use relative values. In this way, only two products can ever be compared at once. The following demonstration always assumes that material 1 is the product with the lower volume price. Ma-

ried out with the plastics being compared. Often, however, there are no trials to form the basis of the cycle time comparison. In such cases, the cooling times must be estimated on a theoretical basis [1]. If the non-productive times can or must be ignored because they are very small in relation to the cooling time or because they are simply unknown, then equation (4) can be simplified, by using the formula for cooling time estimation, to:

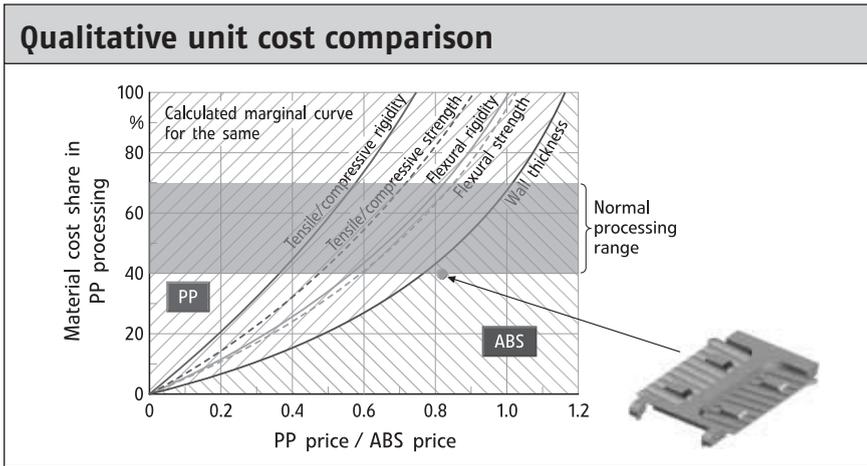


Fig. 1. Demarcation of the zones with lower unit costs in ABS and PP processing by marginal curves, using the example of an espresso machine lid

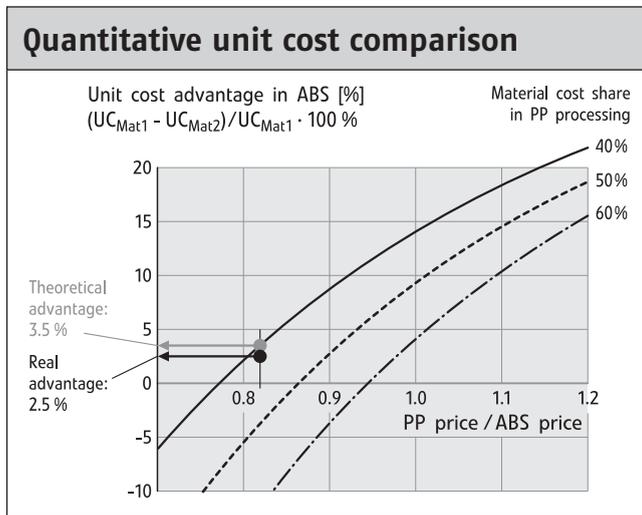


Fig. 2. Unit cost advantage in ABS processing as compared with PP processing using the example of an espresso machine lid with the same wall thickness

pared with the calculations for the same wall thickness.

With a PP/ABS price ratio of 0.82 at the time of the trials and an actual material cost share of 40 %, the point that describes the actual product comparison for PP production is right underneath the marginal curve for the same wall thickness in the ABS range. In fact, the subsequent calculation produced unit costs of 0.208 EUR for ABS and 0.212 EUR for PP. This agrees with the theoretical result that the point lies right underneath the marginal curve for the same wall thickness.

Determination of Unit Cost Advantage

Although inequation (3) and Fig. 1 enable us to obtain a clear picture of the relationship between the dependencies, they provide only a qualitative prediction of unit costs. A quantitative unit cost comparison can be derived from equation (8):

$$\frac{UC_{mat\ 1} - UC_{mat\ 2}}{UC_{mat\ 1}} = 1 + \frac{MC_{mat\ 1}}{UC_{mat\ 1}} \cdot \left(\frac{PC_{mat\ 2}}{PC_{mat\ 1}} - \frac{MC_{mat\ 2}}{MC_{mat\ 1}} \right) - \frac{PC_{mat\ 2}}{PC_{mat\ 1}} \quad (8)$$

This equation is also illustrated by using the results of the trials with the espresso machine lid. In Fig. 2, the unit cost advantages for ABS are plotted for different material cost shares, with the ABS and PP components having the same wall thickness. It can be seen again in this example that the theoretically determined unit cost advantage (based on the cooling time calculation) is very close to the practically determined value.

ity of the production process. The simpler the production process and the more cavities in the mould, the greater is the material cost share. For the majority of injection mouldings, the material cost share is between 40 and 70 %. This value is normally known from experience with similar parts.

Inequation (3) is illustrated by Fig. 1, which compares the unit costs of an espresso machine lid made from PP with those of a lid made from ABS. The material cost share is plotted against the ratio of the material prices. The following applies to the curves:

- All curves are marginal curves, below which ABS, and above which PP, is calculated to have the lower unit costs.
- All curves are based on the theoretical estimation of cooling times according to equation (5).
- The different curves arise from the assumption that wall thickness can be adapted to the specified requirements.

Since corresponding trials were carried out in the BASF Technical Centre, the

exact “operating point” for this production process could also be plotted in the graph. Since the same mould was used for PP and ABS, the results had to be com-

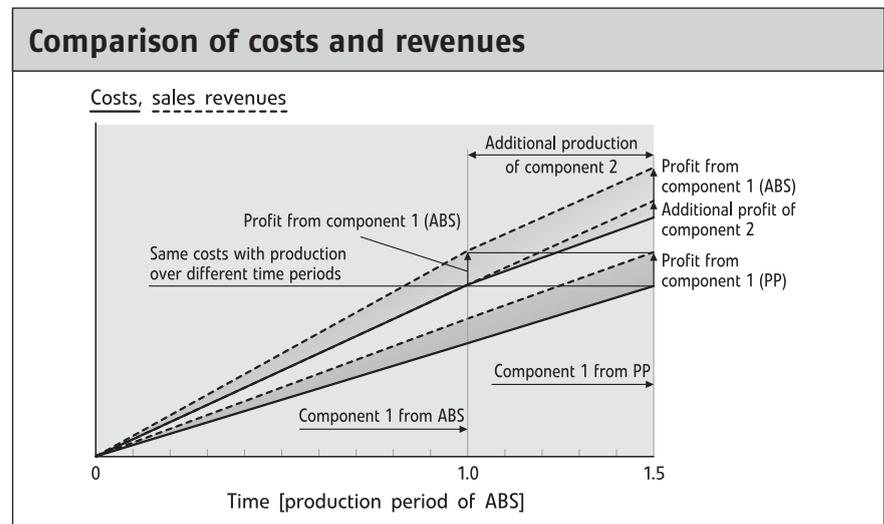


Fig. 3. Comparison of the cost and sales revenue curves plotted against time for thermoplastics with different cycle times

Return on Capital Investment Comparison

To assess the profitability of a production process, unit costs are not sufficient, since ultimately return on capital investment should be optimised. A clear explanation of the need for such considerations is given in Fig. 3, which compares the cost and revenue situation for the production of the same quantity of parts from two different plastics (PP and ABS). The restriction is that this represents the marginal case in which the unit costs for both plastics should be the same. This roughly corresponds to the example of the espresso machine lid. Assuming that the revenues are also the same, then after production of a given number of parts in both plastics, the same costs and revenues should be obtained. However, the machine on which the plastic with the shorter cycle time is being processed is available sooner for the next order. This gives rise to an additional profit.

This effect is taken into account by calculating the return on capital investment:

$$ROCI = \frac{\text{Profit}}{\text{Capital}} = \frac{S - UC}{ICAP + MCAP} \quad (9)$$

The only capital investment included in the return on capital investment calculation is that for the machinery and moulds. For the calculation of return on capital investment, the same applies as for unit costs. Since the absolute amounts are not known, it is necessary to switch to relative values. After some conversions, we obtain the equation for calculating the return on capital investment difference:

$$\frac{ROCI_{mat2} - ROCI_{mat1}}{ROCI_{mat1}} = \frac{1}{SR_{mat1}} \left[1 - (1 - SR_{mat1}) \cdot \frac{UC_{mat2}}{UC_{mat1}} \right] \cdot cap - 1 \quad (10)$$

with the unit cost ratio

$$\frac{UC_{mat2}}{UC_{mat1}} = \frac{MC_{mat1}}{UC_{mat1}} \cdot \left(\frac{MC_{mat2}}{MC_{mat1}} - \frac{PC_{mat2}}{PC_{mat1}} \right) + \frac{PC_{mat2}}{PC_{mat1}} \quad (11)$$

and the ratio of capital used cap. In addition to the material cost share parameter MC/UC, the percentage return on sales S also goes into the equation:

$$SR_{mat1} = \frac{PR_{mat1}}{S} \quad (12)$$

This is frequently of the order of 5 to 20 %.

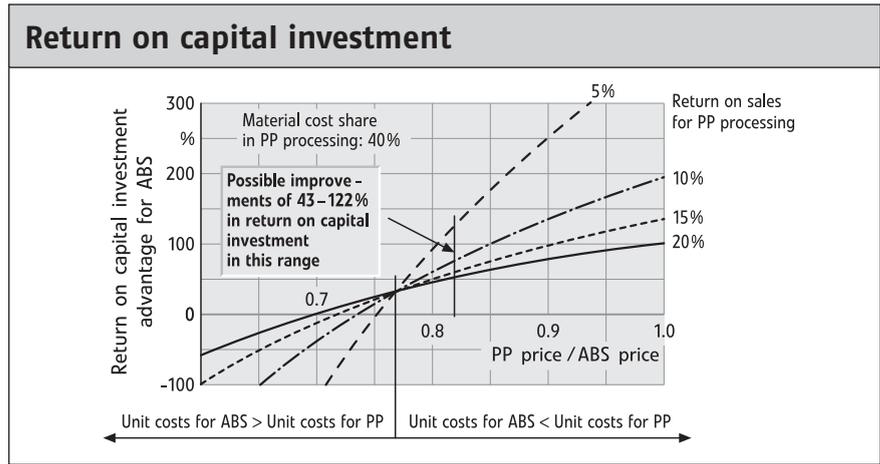


Fig. 4. Return on capital investment advantage in ABS processing as compared with PP processing, using the example of an espresso machine lid; same wall thickness and a mould value equal to 50% of the injection moulding machine value

As a result of the shorter cycle time with material 2, the injection moulding machine capital used in processing material 2 will be smaller. This is expressed by the ratio of the number of parts being produced to the maximum possible parts that can be produced with material 2. The shorter cycle times of material 2 increase the maximum number of parts that can be produced. The shorter production time on the other hand does not reduce the mould capital used, since the moulds, unlike the injection moulding machine, cannot be employed for another production order:

$$cap = \frac{ICAP_{mat1} + MCAP_{mat1}}{ICAP_{mat2} + MCAP_{mat2}} = \frac{1 + \frac{MV}{IV}}{\frac{t_{cyc\ mat2}}{t_{cyc\ mat1}} + \frac{MV}{IV}} \quad (13)$$

This capital ratio is always greater than 1 and lies between two limits. The lower limit is 1 if the injection moulding machines are fully depreciated. In this case only the mould capital still counts. Then, the outcome of the return on capital investment comparison is identical with the outcome of the unit cost comparison. The top limit is defined by the ratio of the cycle times, provided that the mould capital is negligible in relation to that for the injection moulding machines:

$$1 \leq cap \leq \frac{t_{cyc\ mat1}}{t_{cyc\ mat2}} \quad (14)$$

The return on capital investment ratio is shown in Fig. 4 for the example of the espresso machine lid. The material cost share parameter (in production with PP) is as-

sumed to be 40 %, as it was also in the trials, and was not varied. For this calculation, a further ratio of the mould value to the injection moulding machine value must be used, which in this example was

Key to symbols used in the equations

a _{eff}	effective thermal conductivity
E	elastic modulus
ICAP	injection moulding machine capital used for production
IV	injection moulding machine value
MC	material costs
MCAP	mould capital used for production
MV	mould value
P	material price per weight
PC	production costs
PR	profit
ROCI	return on capital investment
s	wall thickness
S	Sales
SR	return on sales
t _{cool}	cooling time
t _{cyc}	cycle time
t _{non-prod}	non-productive time
UC	unit costs
V	component volume
ρ	density
σ _{perm}	permissible stress

assumed to be 50 %. The smaller this value is, the better the result for ABS. The percentage return on sales was varied from 5 to 20 %. A typical feature of these graphs is that all the curves for the different percentage returns on sales intersect at the same unit cost point.

The use of the return on capital investment comparison, however, presupposes that the injection moulding machines are fully utilised. If the machine cannot be used for a follow-on order when production of the planned quantity has been completed, then material selection must be decided by a unit cost comparison.

Summary

The material price is frequently cited as the most important product property. However, in comparing products from different product classes such as PP and ABS or PP LGF and PA GF, even just the different cooling behaviour gives rise to different manufacturing costs, which makes polymer selection on the basis of material price alone impossible.

By comparing two polymers on the basis of relative values, the more economic product can be identified. However, profitability should not be analysed solely on the basis of unit costs but rather a return on capital investment calculation should be carried out. ■

THE AUTHOR

DR.-ING. HANS-JOACHIM PITZ, born in 1957, has been employed by BASF AG, Ludwigshafen since 1988. For a long time, he was head of the CAE Services Group. In March 2003, he took over as head of Interior and Exterior Application Developments. hans-joachim.pitz@basf-ag.de

Title photo. "Time is money" is seen as a generally applicable maxim in many areas of the economy, but in the injection moulding industry it can be further restricted: "Cycle time is money". Below, we describe the calculation in detail

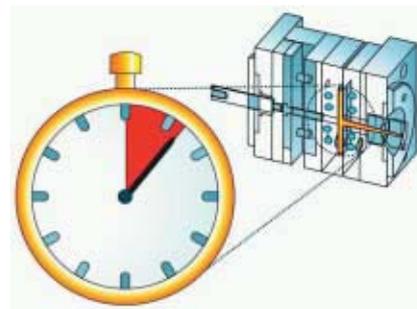
Zykluszeit ist Geld

Wirtschaftlichkeitsvergleich. Die Auswahl von Polymeren für die Teilefertigung erfolgt unter technischen und wirtschaftlichen Aspekten sowie gemäß Designvorgaben. Unterschiede in den Verarbeitungskosten können dazu führen, dass die Herstellkosten eines Produkts in Anwendungen mit teureren Thermoplasten niedriger ausfallen als beim Einsatz billigerer Kunststoffe. Das kann soweit gehen, dass Polymere, die höhere Stückkosten verursachen, trotzdem eine bessere Kapitalrentabilität aufweisen.



HANS-JOACHIM PITZ

Als Wirtschaftlichkeitskriterium bei der Polymerauswahl wird oftmals nur der Preis pro Volumen verschiedener Produkte verglichen. Um die Wirtschaftlichkeit von Polymeren fundiert zu vergleichen, hat die BASF einen Stückkosten- und Kapitalrentabilitätsvergleich entwickelt. Da dieser Vergleich auf relativen Größen basiert, kommt er ohne genaues Zahlenmaterial aus, das üblicherweise für eine Kostenkalkulation benötigt wird. Dadurch eignet sich der vorgestellte Vergleich besonders für die Anforderungen einer Materialvorauswahl im Rahmen neuer Projekte.



„Zeit ist Geld.“ Diese Devise, in vielen Bereichen der Wirtschaft als allgemein gültig angesehen, lässt sich beim Spritzgießen noch enger fassen: „Zykluszeit ist Geld.“ Wie die Rechnung aufgeht, wird hier im Detail beschrieben.

Ein einfacher Kostenvergleich ist aber nur möglich, wenn darin nur Kosten vorkommen, die entweder vom Bauteilvolumen oder von der Zykluszeit abhängen. Das macht es notwendig, alle Fertigungskosten vereinfachend als proportional zur Zykluszeit anzunehmen, was hauptsächlich bei der Werkzeugabschreibung einen Fehler nach sich ziehen kann. Im Rahmen der durch die Zykluszeitabschätzung gegebenen Genauigkeit dieser Betrachtung kann dieser Fehler vernachlässigt werden.

Auf Basis der Kostenanteile werden die Stückkosten berechnet.

$$SK = MK + FK \tag{1}$$

mit $MK = f(V)$ und $SK = f(t_k)$

Vergleich durch relative Größen

Zum Zeitpunkt einer Produktvorauswahl liegen die für eine Kalkulation der Stückkosten notwendigen Daten noch nicht vor. Einen Stückkostenvergleich direkt zu berechnen, um zu überprüfen, ob ein Material 2 mit einem höheren Volumenpreis nicht doch günstiger ist als das preiswertere Material 1

$$SK_{Mat.2} < SK_{Mat.1} \tag{2}$$

ist also nicht so einfach möglich. Einen Ausweg bietet die Verwendung relativer Größen. Auf diese Weise können immer nur zwei Produkte miteinander verglichen ▶

Kostenarten für Vergleich

Ein Wirtschaftlichkeitsvergleich erfordert es, alle Kosten zu berücksichtigen, die für die Fertigung des Produkts maßgeblich sind. In Tabelle 1 sind diese Kosten getrennt nach Material- und Fertigungskosten zusammengestellt.

Materialkosten einschließlich der Nebenkosten sind abhängig vom Bauteilvolumen. Personalkosten, Hallenmiete, Maschinenabschreibungen, Stromkosten und, vereinfachend angenommen, auch die Temperierkosten sind im Wesentlichen von der Fertigungsdauer und damit von der Zykluszeit abhängig. Werkzeugkosten sind hingegen stückzahlabhängig.

Kostenschlüssel

Kostenarten	abhängig von
Materialkosten	
Rohstoff	Bauteilvolumen
Materialnebenkosten	Bauteilvolumen
Fertigungskosten	
Personal	Zykluszeit
Maschinenabschreibung	Zykluszeit
Hallenmiete	Zykluszeit
Strom	Zykluszeit
Temperierung	Zykluszeit/Polymer
Werkzeugabschreibung	Stückzahl

Tabelle 1. Kostenarten bei der Spritzgießfertigung

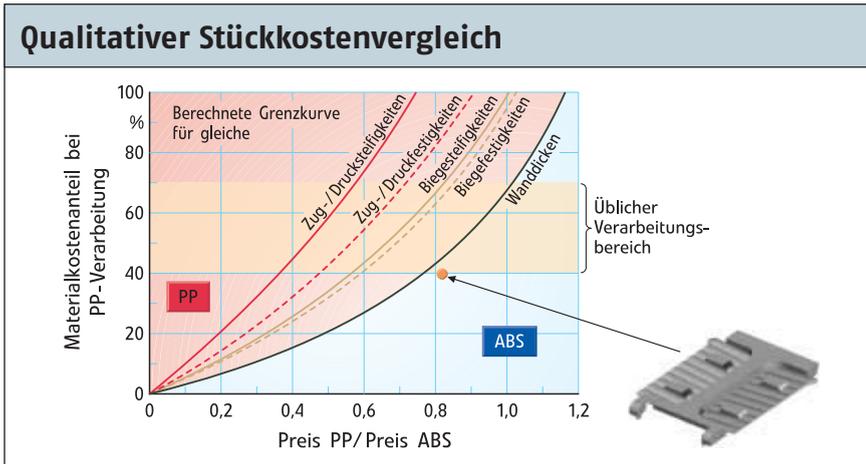


Bild 1. Abgrenzung der Bereiche mit geringeren Stückkosten bei ABS- und PP-Verarbeitung durch Grenzkurven am Beispiel eines Espressomaschinendeckels

werden. Den folgenden Darstellungen liegt immer die Annahme zugrunde, dass Material 1 das Produkt mit dem niedrigeren Volumenpreis ist. Material 2 soll das Produkt mit dem höheren Volumenpreis, aber den kürzeren Zykluszeiten und damit niedrigeren Verarbeitungskosten sein.

Durch Umformung von Ungleichung (2) ergibt sich eine Darstellung, in der nur bekannte Größen vorkommen, die einfach zu bestimmen oder abzuschätzen sind.

$$\frac{MK_{Mat.1}}{SK_{Mat.1}} < \frac{1 - \frac{FK_{Mat.2}}{FK_{Mat.1}}}{\frac{MK_{Mat.2}}{MK_{Mat.1}} - \frac{FK_{Mat.2}}{FK_{Mat.1}}} \quad (3)$$

Wenn Ungleichung (3) erfüllt wird, bedeutet das, dass auch Ungleichung (2) erfüllt ist. Damit sind die Stückkosten von Material 2 niedriger. Wenn dies der Fall ist, ist das Material mit dem höheren Volumenpreis günstiger.

Die in Ungleichung (3) vorkommenden Fertigungs- und Materialkostenverhältnisse werden in den folgenden Abschnitten besprochen.

Das Fertigungskostenverhältnis $FK_{Mat.2}/FK_{Mat.1}$

Die Fertigungskosten pro Zeiteinheit und die zu fertigende Stückzahl werden für beide Materialien als gleich angenommen. Damit reduziert sich das Fertigungskostenverhältnis auf das Verhältnis der Zykluszeiten, die sich aus der Summe von Kühlzeiten plus Nebenzeiten ergeben.

$$\frac{FK_{Mat.2}}{FK_{Mat.1}} = \frac{(t_{Kühl} + t_{Neben})_{Mat.2}}{(t_{Kühl} + t_{Neben})_{Mat.1}} \quad (4)$$

Ideal ist es, wenn das Verhältnis der Zykluszeiten durch einen Verarbeitungsversuch mit den zu vergleichenden Kunststoffen bekannt ist.

Oft liegen keine Versuche zum Zykluszeitvergleich vor. In diesen Fällen müssen die Kühlzeiten rechnerisch abgeschätzt werden [1]. Wenn auch noch die Nebenzeiten vernachlässigt werden können oder müssen, weil sie sehr klein im Verhältnis zur Kühlzeit sind oder weil sie einfach unbekannt sind, vereinfacht sich Gleichung (4) unter

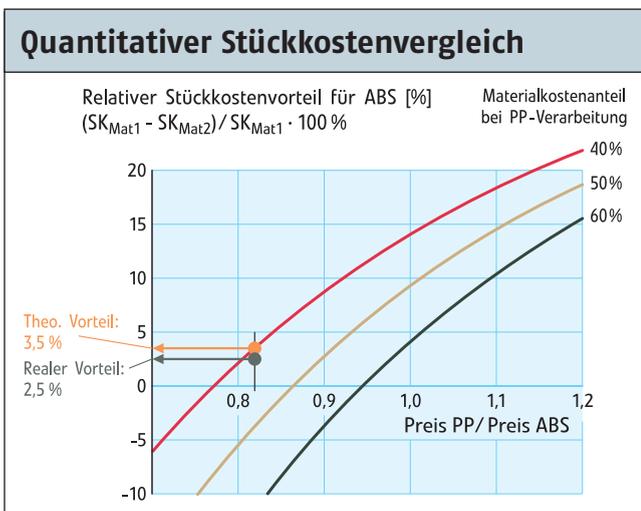


Bild 2. Stückkostenvorteil bei ABS-Verarbeitung im Vergleich zur PP-Verarbeitung am Beispiel eines Espressomaschinendeckels bei gleichen Wanddicken

Verwendung der Formel zur Kühlzeitabschätzung zu

$$\frac{FK_{Mat.2}}{FK_{Mat.1}} = \frac{s_{Mat.2}^2}{s_{Mat.1}^2} \cdot \frac{a_{effMat.2}}{a_{effMat.1}} \quad (5)$$

Sofern unterschiedliche mechanische Eigenschaften zur Gewichtsoptimierung der Bauteile ausgenutzt werden, sollte man dies auch für das Fertigungskostenverhältnis durch unterschiedliche Wanddicken s für beide Produkte berücksichtigen. Durch den quadratischen Einfluss der Wanddicken auf die Fertigungskosten ist dieses Einsparpotenzial nicht zu unterschätzen.

Das Materialkostenverhältnis $MK_{Mat.2}/MK_{Mat.1}$

Die Materialkosten MK bestimmen sich aus den Bauteilvolumina V , den Materialdichten ρ und den Preisen P der Produkte. Damit ergibt sich für das Materialkostenverhältnis

$$\frac{MK_{Mat.2}}{MK_{Mat.1}} = \frac{V_{Mat.2} \cdot \rho_{Mat.2} \cdot P_{Mat.2}}{V_{Mat.1} \cdot \rho_{Mat.1} \cdot P_{Mat.1}} \quad (6)$$

Um Steifigkeits- und Festigkeitsunterschiede der zu vergleichenden Produkte miteinbeziehen zu können, muss die zusätzliche Annahme getroffen werden, dass die Bauteile eine konstante Wanddicke haben. Somit kürzt sich die Bauteilfläche aus Gleichung (6), die sich zu (7) vereinfacht:

$$\frac{MK_{Mat.2}}{MK_{Mat.1}} = \frac{s_{Mat.2}}{s_{Mat.1}} \cdot \frac{\rho_{Mat.2}}{\rho_{Mat.1}} \cdot \frac{P_{Mat.2}}{P_{Mat.1}} \quad (7)$$

Einfluss der Festigkeit auf Bauteilkosten

In die Gleichungen (5) und (7) können die Wanddicken entsprechend der mechanischen Materialeigenschaften eingesetzt werden. Die mögliche Wanddickenreduktion bei einem Material höherer Festigkeit und Steifigkeit hängt nicht nur von den Materialeigenschaften, sondern auch von der Art der Beanspruchung ab. Um diesen Einfluss abzuschätzen, gelten die in Tabelle 2 aufgeführten Zusammenhänge.

Die meisten Bauteile werden hauptsächlich durch Biegung belastet. Also müssen für Wirtschaftlichkeitsvergleiche hauptsächlich zwei Fälle betrachtet werden:

- gleiche Wanddicken, wenn dies aus Design- oder Fertigungsgründen notwendig ist, oder

- gleiche Biegesteifigkeit oder Festigkeit, wenn Änderungen der Wanddicken zulässig sind.

Anteil der Materialkosten an den Stückkosten

Der Anteil der Materialkosten an den Stückkosten ist abhängig von der Komplexität der Fertigung. Je einfacher die Fertigung und je größer die Fachzahl der Werkzeuge ist, desto größer ist in der Regel der Materialkostenanteil. Für einen Großteil der Spritzgussteile liegt er zwischen 40 und 70 %. Durch Erfahrungen mit ähnlichen Teilen ist dieser Wert normalerweise bekannt.

Ungleichung (3) wird durch Bild 1 veranschaulicht, das die Stückkosten eines Espressomaschinendeckels aus PP mit denen eines Deckels aus ABS vergleicht. Der Materialkostenanteil ist gegen das Verhältnis der Materialpreise aufgetragen. Für die Kurven gilt:

- Alle Kurven stellen Grenzkurven dar, unterhalb derer sich für ABS und oberhalb derer sich für PP die geringeren Stückkosten errechnen.
- Alle Kurven basieren auf der theoretischen Abschätzung der Kühlzeiten entsprechend Gleichung (5).
- Die unterschiedlichen Kurven ergeben sich aus den Annahmen, dass die Wanddicken den genannten Anforderungen angepasst werden können.

Da entsprechende Versuche im Technikum der BASF durchgeführt wurden, konnte der genaue „Arbeitspunkt“ für diese Fertigung ebenfalls in dieses Diagramm eingetragen werden. Da dasselbe Werkzeug für PP und ABS verwendet wurde, müssen die Ergebnisse mit den Berechnungen für gleiche Wanddicken verglichen werden.

Mit einem Preisverhältnis PP/ABS von 0,82 zum Zeitpunkt der Versuche und einem tatsächlichen Materialkostenanteil von 40 % für die Fertigung mit PP liegt der Punkt, der den tatsächlichen Produktvergleich beschreibt, dicht unterhalb der Grenzkurve für gleiche Wanddicken im ABS-Bereich. Tatsächlich ergab die Nachkalkulation Stückkosten von 0,208 EUR für ABS und 0,212 EUR für PP. Dies stimmt mit dem theoretischen Ergebnis überein, dass der Punkt dicht unterhalb der Grenzkurve für gleiche Wanddicken liegt.

Ermittlung des Stückkostenvorteils

Aus Ungleichung (3) und Bild 1 ergibt sich zwar ein anschaulicher Zusammenhang

Kosten und Erlöse im Vergleich

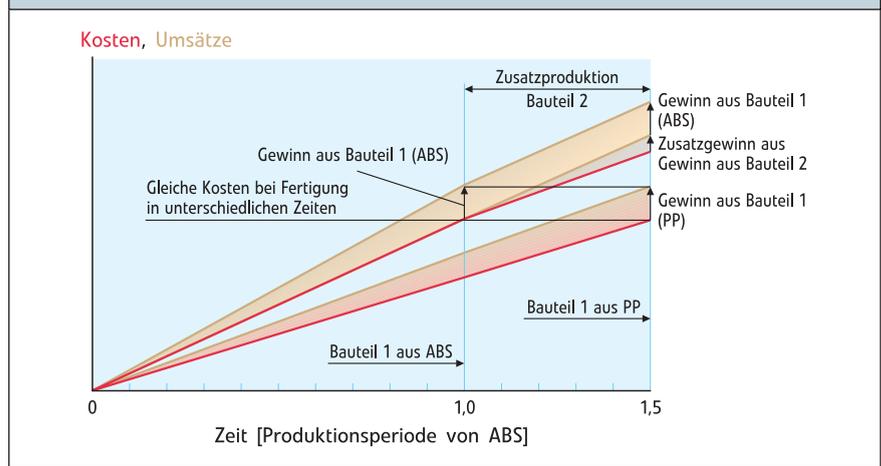


Bild 3. Vergleich der zeitlichen Kosten- und Umsatzentwicklung für Thermoplaste mit unterschiedlichen Zykluszeiten

zwischen den Abhängigkeiten, aber nur eine qualitative Aussage zu den Stückkosten. Ein quantitativer Stückkostenvergleich folgt aus Gleichung (8).

$$\frac{SK_{Mat.1} - SK_{Mat.2}}{SK_{Mat.1}} = 1 + \frac{MK_{Mat.1}}{SK_{Mat.1}} \cdot \left(\frac{FK_{Mat.2}}{FK_{Mat.1}} - \frac{MK_{Mat.2}}{MK_{Mat.1}} \right) - \frac{FK_{Mat.2}}{FK_{Mat.1}} \quad (8)$$

Diese Gleichung wird ebenfalls anhand der Versuchsergebnisse des Espressomaschinendeckels veranschaulicht. In Bild 2 werden die Stückkostenvorteile für ABS bei gleicher Wanddicke des ABS- und PP-Bauteils für verschiedene Materialkostenanteile aufgetragen. Es zeigt sich auch in dieser Darstellung, dass der theoretisch ermittelte Stückkostenvorteil (auf Basis der Kühlzeitberechnung) sehr nahe an dem praktisch ermittelten Wert liegt.

Kapitalrentabilitätsvergleich

Um die Wirtschaftlichkeit einer Fertigung zu beurteilen, reichen Stückkosten nicht, da letztendlich die Kapitalrentabilität optimiert werden sollte. Eine anschauliche Erklärung für die Notwendigkeit dieser Betrachtungen liefert Bild 3, das die Kosten- und Erlössituation für die Fertigung der selben Menge Teile aus zwei unterschiedlichen Kunststoffen (PP und ABS) einander gegenüberstellt. Das Besondere ist, dass dieser Fall den Grenzfall darstellt, bei dem die Stückkosten für beide Kunststoffe gleich sein sollen. Dies entspricht etwa dem Beispiel des Espressomaschinendeckels. Unter der Annahme, dass die Erlöse auch gleich sind, liegen nach Fertigung einer vorgegebenen Stückzahl in beiden Kunststoffen die gleichen Kosten und Erlöse vor. Allerdings kann die Maschine, auf der der Kunststoff mit der kürzeren Zy-

Kapitalrentabilität

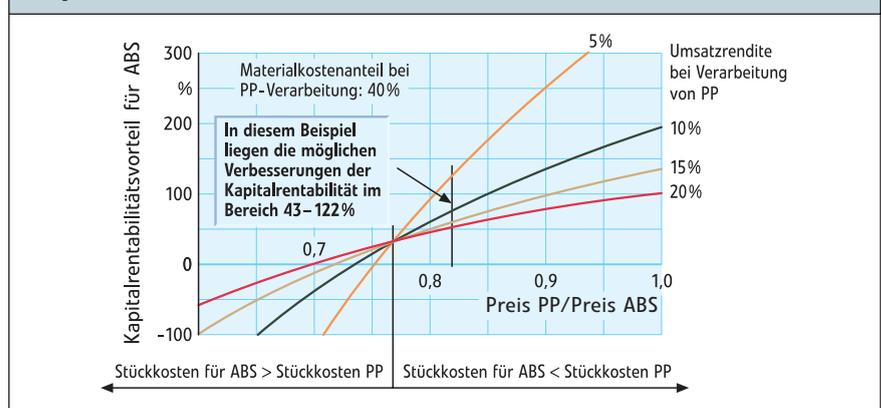


Bild 4. Kapitalrentabilitätsvorteil bei ABS-Verarbeitung im Vergleich zur PP-Verarbeitung am Beispiel eines Espressomaschinendeckels bei gleichen Wanddicken und einem Werkzeugwert von 50 % des Spritzgießmaschinenwerts

Wanddicken		
	Zug/Druck	Biegung
Gleiche Steifigkeiten	$\frac{s_1}{s_2} = \frac{E_2}{E_1}$	$\frac{s_1}{s_2} = 3 \sqrt{\frac{E_2}{E_1}}$
Gleiche Festigkeiten	$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\sigma_{2zul}}{\sigma_{1zul}}$	$\frac{s_1}{s_2} = \sqrt{\frac{\sigma_{2zul}}{\sigma_{1zul}}}$

Tabelle 2. Wanddickenverhältnisse für gleiche Bauteilbeanspruchung

$$1 \leq kap \leq \frac{t_{Z\ Mat.1}}{t_{Z\ Mat.2}} \quad (14)$$

Das Kapitalrentabilitätsverhältnis wird in Bild 4 wieder für das laufende Beispiel Espressomaschinendeckel dargestellt. Der Parameter Materialkostenanteil (bei Fertigung mit PP) wird mit 40 %, wie es sich auch im Versuch ergab, angenommen und nicht weiter variiert. Für diese Berechnung muss weiterhin ein Verhältnis Werkzeugwert zu Spritzgießmaschinenwert eingesetzt werden, das in diesem Beispiel mit 50 % angenommen wird. Je kleiner dieser Wert ist, desto günstiger fällt das Ergebnis für ABS aus. Die Umsatzrentabilität wird dafür von 5 bis 20 % variiert. Typisch für diese Diagramme ist, dass sich alle Kurven für die unterschiedlichen Umsatzrentabilitäten in dem Punkt gleicher Stückkosten schneiden.

Die Anwendung des Kapitalrentabilitätsvergleichs setzt allerdings voraus, dass die Spritzgießmaschinen ausgelastet sind. Wenn die eingesetzte Maschine nach Abschluss der Produktion der geplanten Menge nicht für einen Anschlussauftrag eingesetzt werden kann, muss die Materialauswahl nach dem Stückkostenvergleich entschieden werden.

Zusammenfassung

Der Materialpreis wird häufig als die wichtigste Produkteigenschaft benannt. Bei dem Vergleich von Produkten aus verschiedenen Produktklassen wie z. B. PP und ABS oder PP-LGF und PA-GF führt jedoch allein schon das unterschiedliche Abkühlverhalten zu verschiedenen Herstellkosten, die eine Auswahl des Polymers auf Basis des reinen Materialpreises unmöglich macht.

Durch den Vergleich zweier Polymere auf Basis relativer Größen lässt sich das wirtschaftlichere Produkt herausfinden. Die Wirtschaftlichkeit darf aber nicht nur anhand der Stückkosten analysiert werden, vielmehr sollte der Verantwortliche auch eine Kapitalrentabilitätsbetrachtung durchführen. ■

LITERATUR

- 1 Menges/Mohren: Anleitung zum Bau von Spritzgießwerkzeugen. Carl Hanser Verlag, München 1999

DER AUTOR

DR.-ING. HANS-JOACHIM PITZ, geb. 1957, ist seit 1988 für die BASF AG, Ludwigshafen, tätig. Lange Zeit war er Leiter der Gruppe CAE-Services. Im März 2003 übernahm er die Leitung der Anwendungsentwicklungen Interior und Exterior; hans-joachim.pitz@basf-ag.de

kluszeit verarbeitet wird, schon wieder für den nächsten Auftrag eingesetzt werden. Dadurch entsteht ein Zusatzgewinn.

Dieser Effekt wird durch die Betrachtung der Kapitalrentabilität erfasst:

$$KR = \frac{\text{Gewinn}}{\text{Kapital}} = \frac{U - SK}{SKAP + WKAP} \quad (9)$$

Als Kapital für die Renditebetrachtung zählen nur die Maschinen und Werkzeuge. Für die Betrachtung der Kapitalrentabilität gilt das Gleiche wie für die Stückkosten. Da die absoluten Beträge nicht bekannt sind, muss auf relative Größen ausgewichen werden. Nach einigen Umrechnungen ergibt sich als Gleichung für die Berechnung der Kapitalrentabilitätsdifferenz

$$\frac{KR_{Mat.2} - KR_{Mat.1}}{KR_{Mat.1}} = \frac{1}{U_{Mat.1}}$$

$$\left[1 - (1 - U_{Mat.1}) \cdot \frac{SK_{Mat.2}}{SK_{Mat.1}} \right] \cdot kap - 1 \quad (10)$$

mit dem Stückkostenverhältnis

$$\frac{SK_{Mat.2}}{SK_{Mat.1}} = \frac{MK_{Mat.1}}{SK_{Mat.1}}$$

$$\cdot \left(\frac{MK_{Mat.2}}{MK_{Mat.1}} - \frac{FK_{Mat.2}}{FK_{Mat.1}} \right) + \frac{FK_{Mat.2}}{FK_{Mat.1}} \quad (11)$$

und dem Verhältnis des eingesetzten Kapitals kap. Neben dem Parameter Materialkostenanteil MK/SK geht noch die Umsatzrentabilität U ein.

$$U_{Mat.1} = \frac{G_{Mat.1}}{U} \quad (12)$$

Diese liegt häufig in der Größenordnung von 5 bis 20 %.

Durch die kürzere Zykluszeit von Material 2 wird das einzusetzende Spritzgießmaschinenkapital bei Verarbeitung von Material 2 kleiner. Dies wird durch das Verhältnis der zu fertigenden Stückzahl mit Material 2 ausgedrückt. Die kürzeren Zykluszeiten von Material 2 vergrößern die maximale Stückzahl, die produziert werden kann. Die kürzere Fertigungsdauer reduziert dagegen nicht das einzusetzende

Werkzeugkapital, da die Werkzeuge im Gegensatz zu den Spritzgießmaschinen nicht für eine andere Fertigung eingesetzt werden können.

$$kap = \frac{SKAP_{Mat.1} + WKAP_{Mat.1}}{SKAP_{Mat.2} + WKAP_{Mat.2}} = \frac{1 + \frac{WW}{MW}}{\frac{t_{zMat.2}}{t_{zMat.1}} + \frac{WW}{MW}} \quad (13)$$

Dieses Kapitalverhältnis ist immer größer als 1 und liegt zwischen zwei Grenzen. Die untere Grenze ist 1, wenn die Spritzgießmaschinen abgeschrieben sind. In diesem Fall zählt nur noch das Werkzeugkapital. Die Aussage des Kapitalrentabilitätsvergleichs ist dann identisch mit der Aussage des Stückkostenvergleichs. Die obere Grenze wird durch das Verhältnis der Zykluszeiten gegeben, wenn das Werkzeugkapital in Relation zum Kapital der Spritzgießmaschinen vernachlässigbar ist.

Formelzeichen	
a _{eff}	effektive Wärmeleitfähigkeit
E	Elastizitätsmodul
FK	Fertigungskosten
KR	Kapitalrentabilität
MK	Materialkosten
MW	Spritzgießmaschinenwert
P	Materialpreis pro Gewicht
s	Wanddicke
SK	Stückkosten
SKAP	Spritzgießmaschinenkapital, das für die Fertigung eingesetzt wird
t _{Kühl}	Kühlzeit
t _{Neben}	Nebenzeiten
t _z	Zykluszeit
V	Bauteilvolumen
WKAP	Werkzeugkapital, das für die Fertigung eingesetzt wird
WW	Werkzeugwert
U	Umsatzrendite
ρ	Dichte
σ _{zul}	Grenzspannung