

Limon GmbH

Große Rosenstraße 21
34117 Kassel

ifu Hamburg GmbH

Max-Brauer-Allee 50
22765 Hamburg

**Entwicklung von Werkzeugen zur Entwicklung, Bewertung und Kontrolle von
Energieeffizienzmaßnahmen in der Industrie aus Produktions- und Prozesssicht
(ENBEKO)**

Phase 1 - Konzeptphase

Abschlussbericht des Forschungsprojekts
gefördert unter dem Az: 26999-24/0 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Autor

Dipl.-Ing. Lars Martin

August 2011

Projektbeginn: 01.03.2010

Projektende: 30.04.2011

Projektkennblatt

der

Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	26999	Referat	24	Fördersumme	87.340
Antragstitel	Entwicklung von Werkzeugen zur Entwicklung, Bewertung und Kontrolle von Energieeffizienzmaßnahmen in der Industrie aus Produktions- und Prozesssicht (ENBEKO)				
Stichworte	Energie, Effizienz, Software, Bewertung				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
1 Jahr	01.03.2010	31.05.2011	1		
Zwischenberichte	Zwischenbericht	Abschlussbericht	15.08.2010		
Bewilligungsempfänger	Limón GmbH Große Rosenstraße 21 34117 Kassel			Tel	+49 561 220704-35
				Fax	+49 561 220704-99
				Projektleitung	
				Dr.-Ing. Mark Junge	
				Bearbeiter	
				Dipl.-Ing. Lars Martin	
Kooperationspartner	ifu Hamburg GmbH Grosse Bergstraße 219 22767 Hamburg				

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Der Klimawandel sowie die Rohstoffverknappung und steigende Preise für Öl, Gas und Strom erfordern eine deutliche Steigerung der Energieproduktivität. Die Identifikation von Energieeffizienzpotenzialen in produzierenden Unternehmen und die damit verbundene Beurteilung der eingesetzten Technologien ist allerdings aufgrund der hohen Komplexität sehr aufwändig.

Ziel des Projektes ENBEKO ist es, Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, welche es erlauben in Industriebetrieben die aktuelle Situation hinsichtlich Energieeffizienz zu bewerten, Potenziale darzustellen und bei der Maßnahmenentwicklung zu unterstützen. Darüber hinaus sollen die durch umgesetzte Maßnahmen erzielten Einsparungen überprüft und quantifiziert werden können. Hierfür werden, neben den vorhandenen Technologien, veränderliche Parameter wie Temperatur, Produktionsmengen, Produkttypen etc. berücksichtigt.

Das Projektkonsortium bringt dabei das jeweilige spezifische Wissen in das Projekt ein. Neben den Kenntnissen rund um das Thema Energieeffizienz ist dabei Know-how hinsichtlich der Programmentwicklung erforderlich, das die ifu Hamburg mitbringt. Die Kenntnisse in der Erstellung von Bilanzierungen aus den ökologischen Bereichen ermöglichen es dem ifu Hamburg sich schnell in die Thematik der energetischen und ökonomischen Bilanzierung einzuarbeiten. Das ifu Hamburg sieht in dem Bereich der Softwareentwicklung für die energetische Bilanzierung und Potenzialabschätzung einen Wachstumsmarkt.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die Softwarelösung ENBEKO entsteht auf Basis einer Prozessoptimierungssoftware, die um Energie, Effizienz- und Maßnahmenkataloge erweitert wird. Die notwendigen Schritte umfassen dabei die konzeptionelle Gestaltung der Software, sowie die programmtechnische Umsetzung. In der konzeptionellen Phase werden die Bedürfnisse der Zielgruppe erarbeitet und in Zusammenarbeit mit den zukünftigen Anwendern in Workshops die Ziele und Randbedingungen erstellt, die das spätere Programm erfüllen soll. Zudem werden die Strukturen und Umsetzungsmöglichkeiten für die Erstellung der Maßnahmenkataloge erarbeitet. Die Abschätzung der Potenziale erfolgt über Modelle der Fertigungsverfahren, der Primär- und Sekundärprozesse (Gebäudetechnik, Beleuchtung, etc.). Die hierfür notwendigen Arbeitspakete umfassen folgende Tätigkeiten:

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

1. Erarbeitung eines Nutzerkonzepts (z.B. Assistentengeführter Eingabe, Reduzierung auf die wesentlichen Parameter)
2. Entwicklung eines Systems zur Datenaufbereitung
3. Konzeption des Baukastensystems zur Berechnung über verschiedene Modelle
4. Umsetzung in einen Prototyp

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Fazit

Abschließend ist festzuhalten, dass die erste Phase gezeigt hat, dass es möglich ist die energetischen Einsparpotenziale in der kunststoffverarbeitenden Branche durch eine Software, aufzuzeigen. Die Prozesse lassen sich größtenteils mit wenigen Eingabeparametern beschreiben. Die Verknüpfung der einzelnen Teilprozesse lässt sich darüber hinaus durch die Erarbeitung eines Baukastensystems einfach realisieren. Dem Anwender wird somit der Aufwand der komplizierten Modellbildung abgenommen. Die Erarbeitung der mathematischen Beziehungen erforderte allerdings mehr Aufwand als geplant, da im betrieblichen Umfeld nur selten die Eingabegrößen zur Verfügung stehen, die zur wissenschaftlichen Berechnung des Energiebedarfs normalerweise benötigt werden. Hier ist es wichtig mit empirischen Daten oder Vereinfachungen zu rechnen. Desweiteren benötigt die Berechnung aller theoretisch möglichen Optimierungsmaßnahmen im jetzigen Prototyp noch zu viel Zeit, sodass der Einsatz der Software beim Kunden gebremst wird. Hier sind u.a. durch bessere Optimierungsmethoden noch Lösungen zu erarbeiten.

In einer zweiten Phase sollte die Methode dahingehend erweitert werden, dass zum einen die Anzahl der Optimierungsvarianten durch Entscheidungsbäume und/oder Constraints reduziert werden und zum anderen die Methode auf weitere energieintensive Branchen erweitert wird. Hierfür müssen die Berechnungsmethoden und die Analyse der Prozesse noch durchgeführt werden.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

Inhalt

Projektkennblatt	2
1 Kurzfassung des Gesamtvorhabens	6
2 Aufbau der Strukturierung	7
3 Auswahl der Prozesse	8
4 Workshops	10
5 Ermittlung des Energiebedarfs einzelner Komponenten des Spritzgießen.....	11
5.1 Antrieb.....	11
5.1.1 Elektrohydraulischer Antrieb.....	11
5.1.2 Elektromechanischer Antrieb	13
5.1.3 Hybridantrieb.....	14
5.2 Kühlung.....	16
5.2.1 Trockenkühler.....	17
5.2.2 Kühltürme.....	19
5.2.3 Hybridkühler.....	23
5.2.4 Kompressionskältemaschinen	25
6 Bestimmung der Investitionskosten.....	29
7 Umsetzung des Prototypen	30
8 Erkenntnisse.....	40
9 Schlussfolgerung und Ausblick	42
10 Literaturverzeichnis	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Vorgehensweise Datenaufnahme.....	7
Abbildung 2 Leistungsaufnahme des Antriebs einer SGM während eines Zyklus.....	12
Abbildung 3 Elektromechanisch angetriebene Spritzgießmaschine	13
Abbildung 4 Spritzgießmaschine mit Hybridantrieb	14
Abbildung 5 Vor- und Nachteile der Antriebe bei der Spritzgießmaschine	15
Abbildung 6 Berechnungsgrundlagen zum Energiebedarf von Spritzgießmaschinen.....	16
Abbildung 7 Funktionsschema eines Trockenkühlers.....	17
Abbildung 8 Schnittbild eines Gegenstrom-Verdunstungskühlturms mit Radialventilator	19
Abbildung 9 Diagramm zur Ermittlung des Luftmassenstromes bei gegebenem Kühlwasserstrom und gegebener Vor- und Rücklauftemperatur des Kühlwassermassenstroms.....	21
Abbildung 10 Funktionsschema eines Hybridkühlers	23
Abbildung 11 Summenhäufigkeit der Außentemperatur.....	25
Abbildung 12 Funktionsschema einer Kältemaschine	26
Abbildung 13 lg p, h-Diagramm mit eingezeichnetem Kreisprozess für das Kältemittel R134a ..	27
Abbildung 14 Abhängigkeit des COP von der Außentemperatur (eigene Darstellung).....	28
Abbildung 15 Entscheidungsbaum Spritzgießprozess	30
Abbildung 16 Entscheidungsbaum für einen Kühlkreislauf	31
Abbildung 17 Entscheidungsbaum für zwei Kühlkreisläufe.....	31
Abbildung 18 Assistent zur Eingabe des Prozesses	32
Abbildung 19 Eingabemaske zur Spritzgießmaschine.....	32
Abbildung 20 Eingabemaske für den Kühlkreislauf 1	33
Abbildung 21 Eingabemaske für den Kühlkreislauf 2	33
Abbildung 22 Eingabemaske zur wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung.....	34
Abbildung 23 Eingabemaske Ende	34
Abbildung 24 Screenshot des physikalischen Prozesses als Modell in der Software	35
Abbildung 25 Screenshot aus dem Prototyp zur Darstellung der Energieflüsse.....	36
Abbildung 26 Auszug aus der internen Maßnahmendatenbank.....	37
Abbildung 27 Darstellung der Optimierungspotenziale als Maßnahmenkatalog	38
Abbildung 28 Darstellung der Einsparungspotenziale als Maßnahmenkatalog.....	38
Abbildung 29 Darstellung der sortierten Einsparungspotenziale.....	39

1 Kurzfassung des Gesamtvorhabens

Der Klimawandel sowie die Rohstoffverknappung und steigende Preise für Öl, Gas und Strom erfordern eine deutliche Steigerung der Energieproduktivität. Die Identifikation von Energieeffizienzpotenzialen in produzierenden Unternehmen und die damit verbundene Beurteilung der eingesetzten Technologien ist allerdings aufgrund der hohen Komplexität sehr aufwändig.

Ziel des durchgeführten Projektes ENBEKO ist es daher, Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, welche es erlauben in Industriebetrieben die aktuelle Situation hinsichtlich Energieeffizienz zu bewerten, Potenziale darzustellen und bei der Maßnahmenentwicklung zu unterstützen. Darüber hinaus sollen die durch umgesetzte Maßnahmen erzielten Einsparungen überprüft und quantifiziert werden können.

In der ersten Phase wurden anhand einer Branche, der Kunststoffverarbeitenden Industrie, die Methoden entwickelt und Umsetzbarkeit ermittelt. Bei erfolgreichem Abschluss dieser ersten Phase ist es das Ziel in einer zweiten Phase die Methode auf weitere Branchen mit hohem Energieeinsatz zu erweitern.

Das auf dem im Projekt entstehenden Prototyp aufsetzende, geplante Produkt basiert auf einem ganzheitlichen Ansatz als durchgehendes Werkzeug, das konsequent von der Produktions- und Prozessebene ausgeht. Es dient der standardisierten Unterstützung von Energieeffizienz in Industrieunternehmen. Derzeit ist kein vergleichbares Produkt am Markt etabliert.

Das Marktpotenzial für eine zu entwickelnde ENBEKO-Software ist sehr groß, da sie in unterschiedlichsten Branchen eingesetzt werden kann. Das Baukastenprinzip unterstützt die jeweilige branchenspezifische Adaption, wie z.B. Einsatz in Kunststoffverarbeitung oder in Pharmabetrieben. Im Rahmen des Projektes findet zunächst eine Fokussierung auf eine branchenspezifische Lösung für die kunststoffverarbeitende Industrie statt. Als preisgünstige Lösung mit schneller Amortisation soll sie insbesondere auch in KMU's eingesetzt werden.

Der vergleichsweise niedrige Preis für eine ENBEKO-Software und zu erwartende durchschnittliche Energieeinsparpotenziale von 20% und mehr erhöhen die

Verwertungschancen. ENBEKO soll einen nachhaltigen Beitrag zur Energieeffizienzsteigerung in der Industrie am Wirtschaftstandort Deutschland leisten.

2 Aufbau der Strukturierung

Datenaufnahme/Analyse

Durch die entwickelten Werkzeuge wird die Datengenerierung weitestgehend automatisiert. Die entscheidende Entwicklung hierbei ist ein Berechnungswerkzeug mit dem einfache physikalische Modelle nach einem Baukastenprinzip zusammengestellt werden können, um so schnell und einfach weitere Berechnungen durchzuführen, welche die Datenlage verbessern (siehe Abbildung 1).

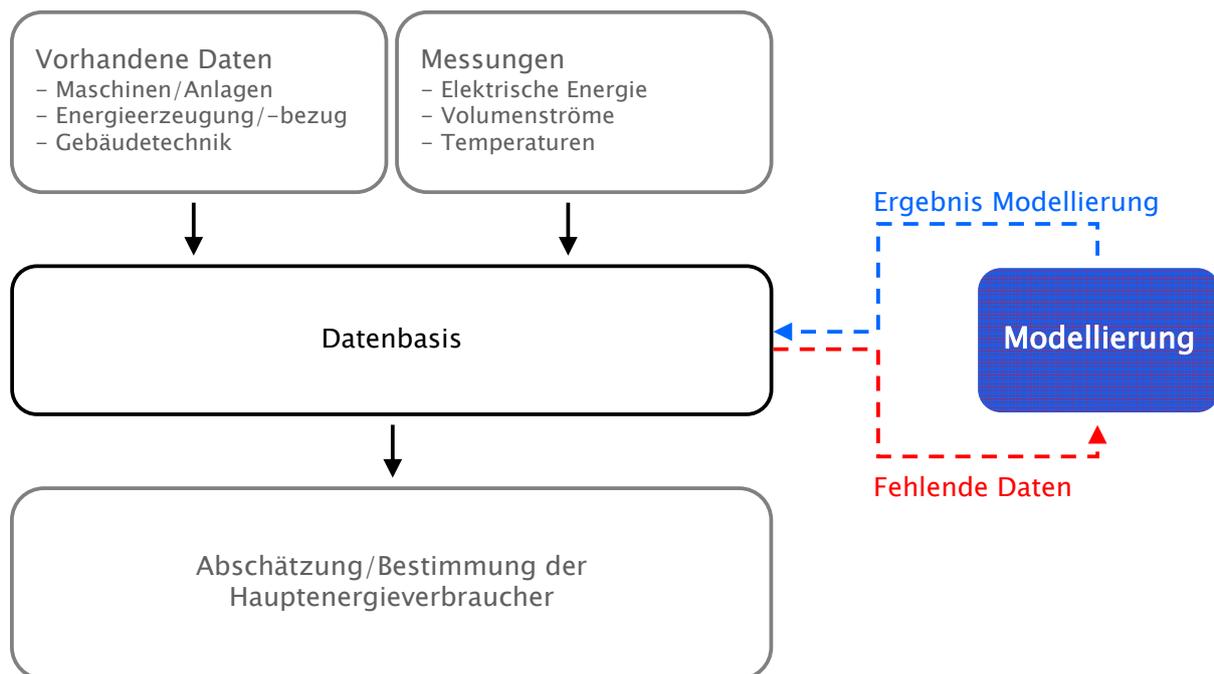


Abbildung 1 Vorgehensweise Datenaufnahme

Zur Bestimmung des Energiebedarfs und Aufzeigen von möglichen Einsparpotenzialen bei den Unternehmen werden die Prozesse durch mathematische oder stochastische Modelle in der Software abgebildet. Diese Modelle ermöglichen die Berechnung des Energiebedarfs anhand von wenigen Eingabeparametern. Bei Gesprächen mit Firmen der

kunststoffverarbeitenden Branche hat sich gezeigt, dass in der alltäglichen Praxis nur sehr wenige Informationen über den Energiebedarf der Maschinen vorliegen. Ein Ziel dieses Forschungsvorhabens war es also die Anzahl der Eingabeparameter so gering wie möglich zu halten. Dies kann je nach Komplexität des Prozesses zu Abweichungen im berechneten Energiebedarf führen. Es wurde deshalb darauf geachtet, dass ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Vereinfachung und Genauigkeit besteht. Der Benutzer benötigt bei der ersten Potenzialabschätzung durch die Methode kaum spezielle Detailinformationen aus der Anlagentechnik, es wird ihm durch die Eingabe von wenigen technischen Parametern eine erste Potenzialabschätzung zur Energieeinsparung geliefert. Dies wird durch die Verwendung von Abschätzungsformeln und Annahmen ermöglicht, wobei immer auf die Qualität der Ergebnisse geachtet wird.

3 Auswahl der Prozesse

Für die Konzepterstellung, die Inhalt dieses Forschungsprojektes war wurden die typischen Prozesse in einem kunststoffverarbeitenden Betrieb identifiziert. Die Branche der Kunststoffverarbeiter ist eine sehr heterogene Branche mit vielen unterschiedlichen Prozessen.

1. Spritzgießen

Beim Spritzgießen wird der Kunststoff aus einem Plastifiziergerät (erwärmt den Kunststoff auf Schmelztemperatur) in einen Hohlraum (Formwerkzeug) gespritzt, in welchem er erst verdichtet wird und dann erkaltet. Das Formteil wird dann automatisch ausgeworfen. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass auch kompliziertere Formteile voll automatisiert sehr schnell in hohen Stückzahlen produziert werden können. Ein Nachteil sind die hohen Stückkosten für die Formwerkzeuge.

2. Extrusion

Beim Extrudieren gelangt der Kunststoff durch einen Trichter in einen Zylinder, wird aufgeschmolzen, homogenisiert und verdichtet, um dann mittels einer Schnecke durch eine Düse gepresst zu werden. Diese Anlage wird Extruder genannt. Extruder werden zur Fertigung von Rohren, Platten, Textilfasern (Schmelzspinnen), Masterbatches (Farbkonzentrate) verwendet.

3. Kalandrieren

Beim Kalandrieren geschieht die Formgebung des Kunststoffes mittels einer Serie von Walzen. Es wird vor allem für die Herstellung von Folien, dünnen Platten, Bodenbelägen verwendet.

4. Rotationsformen

Das Rotationsformen, auch Rotationsguss oder Rotationsintervverfahren genannt, ist ein spezielles Produktions-Verfahren, um große hohle nahtlose Kunststoff-Teile herzustellen. Bei der Herstellung lagert sich geschmolzenes Kunststoff-Granulat beim Abkühlen an den Innenflächen der rotierenden Form ab. Durch die Beschaffenheit des Rotationswerkzeugs lassen sich verschiedene Wandstärken auch innerhalb einer einzigen Form realisieren. Anwendungsgebiete sind unter anderem große Gehäuse und Transportbehälter, aber auch Armaturenbretter, Möbel und Spielzeug werden teilweise mit Rotationsgießen hergestellt.

5. Schäumen

Die Verfahren zur Herstellung von Schaumstoffen lassen sich in drei Kategorien einteilen:

- a. Chemisches Treibverfahren: Die das Material aufschäumenden Gase werden bei der Polymerisation frei (PU-Schäume)
- b. Physikalisches Treibverfahren: Der Reaktionsmischung werden niedrig siedende Flüssigkeiten zugesetzt, die im Verlauf der Polymerisation verdampfen und so die typischen Gasblasen bilden (z. B. Schaumpolystyrol)
- c. Mechanisches Treibverfahren: In eine Schmelze des Kunststoffes wird unter Rühren ein Gas eingeblasen.

6. Blasformen

Beim Blasformen wird ein Thermoplast-Vorformling in einer Form aufgeblasen. Durch die Druckluft legt er sich innen an die Form an und hält diese beim Erkalten. Dieses Verfahren dient vor allem zur Herstellung von Flaschen, Fässern, Autotanks, etc.

Aufgrund der vielfältigen Verfahren und der unterschiedlichen Prozesse wurde für die Konzepterstellung und die Umsetzung in einen Prototyp ein Verfahren ausgewählt.

Die Wahl fiel auf das Spritzgießen, da hier unterschiedliche Maschinen, die sich neben der Technik auch im Energiebedarf stark unterscheiden können, zum Einsatz kommen. Dies ermöglicht auch in dem umgesetzten Prototyp verschiedene Maßnahme zur Energieeffizienz aufzuzeigen.

Neben den primären Herstellprozess (Spritzgießen) kommen weitere Prozesse hinzu, die aus energetischer Sicht interessant sind. Hierzu zählt hauptsächlich die Kühlung der Maschine über eine aktive Wasserkühlung. Neben der eigentlichen Kühltechnik ergeben sich auch Optimierungsmaßnahmen in der Verschaltung der Kühlung mit dem Spritzgießprozess. Beide Maßnahmen wurden im Rahmen des Projekts untersucht und sind den Prototyp eingeflossen. Desweiteren wurde im Prototyp die Wärmeabgabe der Maschine an die Umgebung berücksichtigt, da dies zu Klimatisierungskosten der Produktionsbereiche führen kann.

4 Workshops

Im Projektverlauf wurde die Entscheidung getroffen, die Durchführung eines Workshops aufgrund von häufigen Terminkollisionen nicht weiter zu forcieren und stattdessen in bilaterale Gespräche mit Kunststoffverarbeitern zur Nutzung von ENBEKO einzusteigen.

Hierfür wurde unter anderem auf der VDI-Konferenz „Energieeffizienz in der Kunststoff verarbeitenden Industrie“ in Köln vom 21.-24. April 2010 in einer anschließenden Diskussion intensiv mit Vertretern der Kunststoff verarbeitenden Industrie, Beratungsingenieuren sowie Branchenverbänden diskutiert.

Es zeigte sich, dass ein entsprechender Bedarf zur einfachen und schnellen Ermittlung von Einsparpotenzialen ohne eine aufwändige Konsultierung von Beratern vorhanden ist. In den Anforderungskatalog konnten dabei insbesondere u.a. die einfache Bedienung mit einer übersichtlichen Anzahl an Inputdaten aufgenommen werden.

5 Ermittlung des Energiebedarfs einzelner Komponenten des Spritzgießen

5.1 Antrieb

Es werden drei Antriebsarten bei Spritzgießmaschinen unterschieden:

- elektrohydraulischer Antrieb
- elektromechanischer Antrieb
- Hybridantrieb (hydromechanischer Antrieb mit elektronischem Plastifizierantrieb)

Die Betrachtung der Antriebe ist auch aus Energieeffizienzgründen von besonderem Interesse.

5.1.1 Elektrohydraulischer Antrieb

Bei den elektrohydraulischen Antrieben wird eine zentrale hydraulische Pumpe (Flügelzellenpumpe, Axialkolbenpumpe, Radialkolbenpumpe, Verstellpumpe, Sperrschieberpumpe, Zahnradpumpe) verwendet, die durch einen Elektromotor (meist Drehstrommotor) angetrieben wird.¹

Das Hydrauliköl wird aus dem Tank über Ventile zu den Verbrauchern (Hydrozylinder, Hydromotor) gefördert. Diese wandeln den Volumenstrom und Druck in translatorische (Zylinder) bzw. rotatorische (Motor) Bewegung um.

Auf den ersten Blick werden schon hier die Nachteile eines einfachen, mit nur einer Pumpe betriebenen elektrohydraulischen Antriebs deutlich. Es entstehen:

- Wandlungsverluste, bedingt durch die Umwandlung von elektrischer Energie (Drehstrommotor) in Rotationsenergie und von Druck/Volumenstrom (Pumpe) in wiederum translatorische Energie (Zylinder) und rotatorische Energie (Hydromotor)
- Druckverluste in Leitungen und Ventilen

Außerdem besteht ein stark schwankender Bedarf (Druck, Volumenstrom, Energie) bei den einzelnen Funktionen (Schließen, Düse anlegen, Einspritzen, Nachdrücken, Plastifizieren, Düse abfahren, Öffnen). Das führt bei einer Konstantpumpe, die immer die gleiche Leistung zur Verfügung stellt, zu hohen Verlusten bei weniger energieaufwendigen Funktionen (Düse

¹ Johannaber,S.162 ANPASSUNG, DA SPÄTER QUELLEN AUCH NUR MIT NAME UND SEITE REFERENZIERT WERDEN

anlegen/abfahren), da dieselbe Leistung wie bei energieaufwendigen Funktionen (Einspritzen) bereitgestellt wird, welche dann durch die Ventile dissipiert und durch den Kühlkreislauf abgeführt werden muss.

Da Spritzgießmaschinen in der Regel bei geringer Auslastung gefahren werden, ergibt sich ein energetischer Wirkungsgrad von nur 14%. Aufgrund des extrem schlechten Wirkungsgrads kommt diese Antriebsart nur bei kleinen Maschinen in Frage. Dies gilt allerdings nicht für die elektrohydraulischen Antriebe im Allgemeinen, sondern für Einpumpensysteme mit Konstantpumpen, welche aber bis heute aus Kostengründen zum Einsatz kommen.

Der qualitative Energiebedarf einer Spritzgießmaschine ist in Abbildung 2 dargestellt.

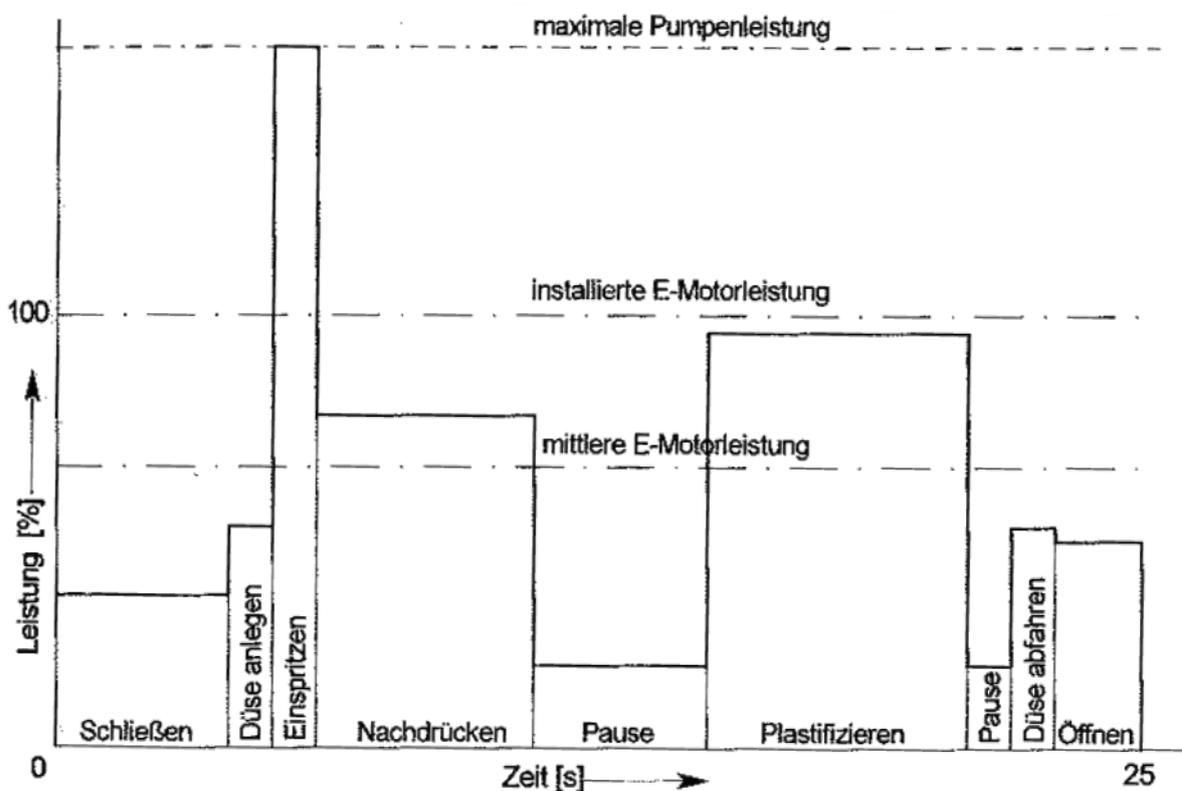


Abbildung 2 Leistungsaufnahme des Antriebs einer SGM während eines Zyklus²

Die oben genannten Nachteile können aber durch konstruktive Maßnahmen, wie z.B. den Einsatz mehrerer und regelbarer Pumpen, drehzahlvariabler Antriebe sowie durch Druckspeicher stark optimiert werden.

² Johannaber, S.191

5.1.2 Elektromechanischer Antrieb

Elektromechanische Antriebe kommen ohne Hydraulikaggregat aus, der Antrieb wird durch mehrere elektrische Motoren bereitgestellt. Die Umwandlung der rotatorischen- in eine translatorische Bewegung wird durch Kugelgewinde bewerkstelligt. Der Aufbau einer elektromechanisch angetriebenen Spritzgießmaschine ist in Abbildung 3 dargestellt.

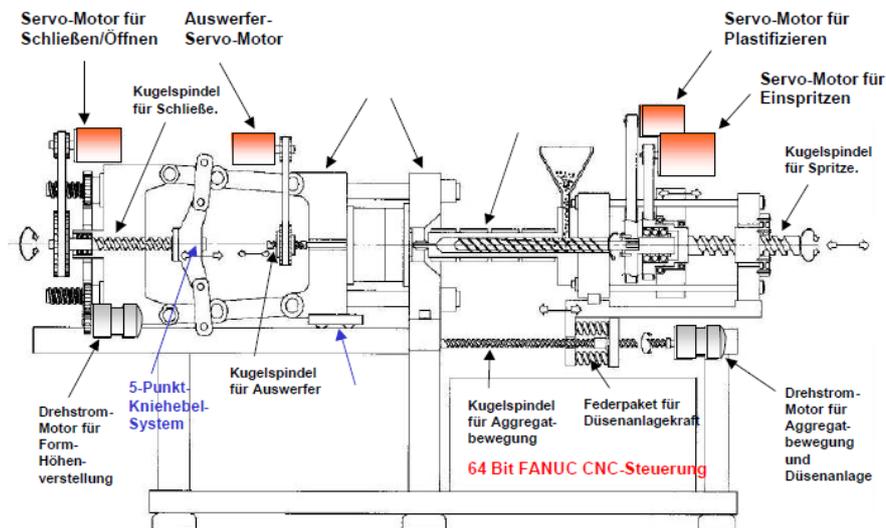


Abbildung 3 Elektromechanisch angetriebene Spritzgießmaschine³

Elektromechanische Antriebe wurden auch schon früher produziert, aber ca. 1970 komplett von den hydromechanischen Antrieben vom Markt verdrängt. Erst durch Innovationen wie etwa dem regelbaren E-Motor und den Umrichtern wurde der Einsatz von elektromechanischen Antrieben wieder interessant. Der Trend in der Herstellung der Spritzgießmaschinen lässt erkennen, dass der Marktanteil der elektromechanischen Antriebe stark steigen wird. Das liegt insbesondere an den zahlreichen Vorteilen, die diese Antriebe zu bieten haben.

Die wesentlichen Vorteile des elektromechanischen Antriebs gegenüber dem hydromechanischen Antrieb sind:

- bedeutend geringerer Energiebedarf (bis zu 50% Ersparnis), der auf die leerlaufverlustfreie Leistungsbereitstellung zurückzuführen ist (vgl. auch Nachteile der hydromechanischen Antriebe)
- guter Wirkungsgrad
- kein Kühlwasserverbrauch
- präzise Arbeitsweise, gute Wiederholgenauigkeit → hohe Qualität, wenig Ausschuss

³ Johannaber Kunststoff Maschinenführer 4. Ausgabe 2004 S.192

- geringe Geräuschentwicklung (<60dB)
- ölfreier Betrieb möglich → Ölmanagement entfällt
- Reinraumbedingungen können leichter erfüllt werden
- geringerer Instandhaltungsaufwand

Die wesentlichen Nachteile des Antriebs liegen im Preis (bis zu 50% höhere Anschaffungskosten) und der Beschränkung der Schließkraft auf max. 8.000 kN.

Die hohen Investitionskosten müssen aber im gesamten Lebenszyklus der Anlage betrachtet werden. Aufgrund der geringeren Energie- und Instandhaltungskosten der Anlage, kann der elektromechanische Antrieb also durchaus eine wirtschaftlich lohnende Alternative sein.

5.1.3 Hybridantrieb

Der Hybridantrieb kombiniert den hydromechanischen Antrieb mit dem elektromechanischen. Der hydromechanische übernimmt dabei die Translationsbewegungen und der elektromechanische den rotatorischen Antrieb für die Schnecke. Ein Beispiel für den Hybridantrieb ist in Abbildung 4 dargestellt.

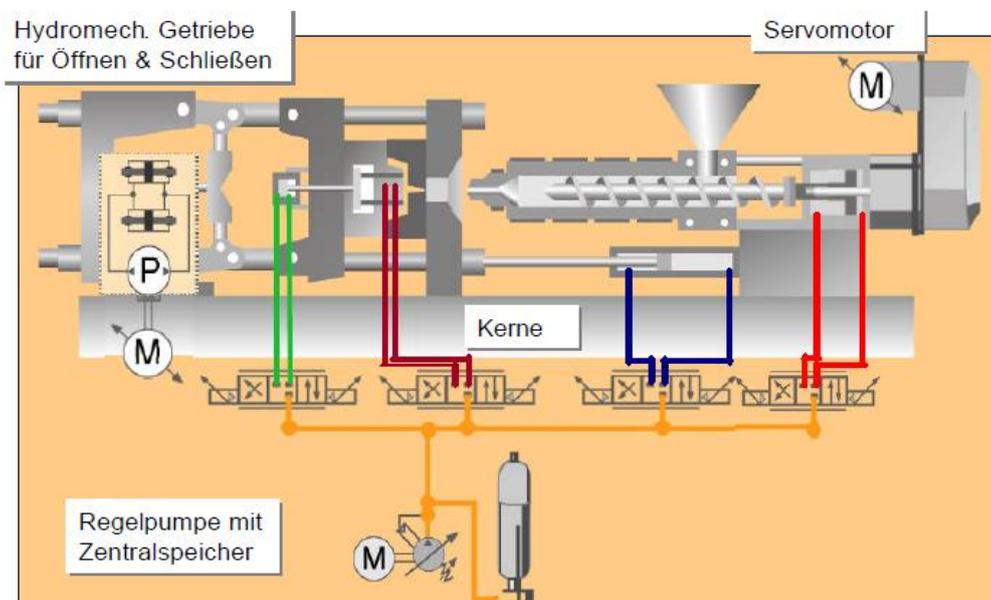


Abbildung 4 Spritzgießmaschine mit Hybridantrieb

Der Vergleich der verschiedenen Antriebsarten ist abschließen nochmal in Abbildung 5 zusammengefasst. Insbesondere sind hierbei die Kosten für die weitere Betrachtung von Interesse.

	Merkmal	Antriebskonzept		
		elektrohydraulisch	elektromechanisch	hybrid ¹⁾
Funktionen	Schließen/Öffnen	+	o	+
	Auswerfen	+	o	+
	Kerne ziehen	+	-	+
	Spritzaggregat vor/zurück	+	o	+
	Einspritzen	+	o	+
	Plastifizieren	o	+	+
Präzision	Soll-/Ist-Abweichung der Positionen	>	<	>
	Reproduzierfähigkeit	>	<	>
	thermisches Gleichgewicht	>	<	>
	Anfahrzubereitung	>	<	>
	Verfügbarkeit	◊	◊	◊
Wartung	Ersatzteilbedarf/-Aufwand	>	<	>
	Serviceaufwand	>	<	>
	Hydraulikölmanagement	>	<	>
	Verschleiß bewegter Stellglieder und bewegter Teile	<	>	<
Kosten	Wirkungsgrad	>	<	(<)
	Energiekosten	>	<	(<)
	Kühlwasserbedarf	>	<	(<)
	Anschaffungskosten	<	>	(>)
Sonstiges	Arbeitsplatzsauberkeit/-Hygiene	>	<	>
	Wärmeentwicklung	>	<	>
	Geräuschbelastigung	>	<	>
	Schmutz	>	<	>

¹⁾ hydromechanischer Antrieb mit elektromechanischem Plastifizierantrieb

Abbildung 5 Vor- und Nachteile der Antriebe bei der Spritzgießmaschine⁴

Für jede Maschine wurden die Berechnungsformeln für den Energiebedarf ermittelt. In Abbildung 6 ist ein Auszug aus den Recherchen dargestellt.

⁴ + gut geeignet, o bedingt geeignet, - nicht geeignet, < besser, <> neutral, > schlechter

Fixe angenommene Werte in Bezug auf die Kunststoffverarbeitung und die SGM:						
Bezeichnung	Bereiche	Einheit	Verwendeter Wert / Berechnungs-formel	(Einheit)	Ggf. Beschreibung	Quelle:
E_{spez} = Spezif. Energiebedarf, hydraulische SGM:	0,8 - 1,2	kWh/kg	1	kWh/kg		Stitz, S. / Keller, W. (2001): <i>Spritzgießtechnik – Verarbeitung-M</i>
E_{spez} = Spezif. Energiebedarf, elektrische SGM:	0,4 - 0,6	kWh/kg	0,5	kWh/kg		Stitz, S. / Keller, W. (2001): <i>Spritzgießtechnik – Verarbeitung-M</i> http://www.win.steiermark.at/cms/dokumente/11263987_524
E_{spez} = Spritzgussbetrieb:	1,6-2,7	kWh/kg				
$A_{Hydraulik}$ = Anteil der Wärmeenergie, der über das Hydrauliköl an den Kühlkreislauf abgegeben wird:	37,00%	Prozent				Energiedienstleistung zur Steigerung der Energieeffizienz von Sp
$A_{Werkzeug}$ = Anteil der Wärmeenergie, die über die Werkzeugkühlung abgegeben werden muss:	43,00%	Prozent				Energiedienstleistung zur Steigerung der Energieeffizienz von Sp
$A_{Konvektion}$ = Konvektionsabwärme:	20,00%	Prozent				Energiedienstleistung zur Steigerung der Energieeffizienz von Sp
Berechnung des elektrischen Energiebedarfes der SGM und die Verteilung der entstehenden Wärmeenergie:						
Bezeichnung	Wert	Einheit	Verwendeter Wert / Berechnungs-formel	(Einheit)	Ggf. Beschreibung	Quelle:
E_{el} = Benötigter Jahresenergiebedarf (elektr.):	80.000,00	kWh/a	$E_{el} = M_{el} \cdot E_{spez}$		Jahresgesamtmenge d. Granulats * Spezif. Energiebedarf pro kg Granulat	
Q_{Gesamt} = Insgesamt Entstehende Wärmemenge (therm.):	80.000,00	kWh/a	$Q_{Gesamt} = E_{el}$		Entspricht der Aufgenommenen elektrischen Energie, da pri	Energiedienstleistung zur Steigerung der Energieeffizienz von Sp
$Q_{Hydraulik}$ = Wärmeenergie Q im Jahr, die über das Hydrauliköl an den Kühlkreislauf der SGM abgegeben wird:	29.600,00	kWh/a	$Q_{Hydraulik} = Q_{Gesamt} \cdot A_{Hydraulik}$			Energiedienstleistung zur Steigerung der Energieeffizienz von Sp
$Q_{Werkzeug}$ = Wärmeenergie Q im Jahr, die über die Werkzeugkühlung abgegeben werden muss:	34.400,00	kWh/a	$Q_{Werkzeug} = Q_{Gesamt} \cdot A_{Werkzeug}$			Energiedienstleistung zur Steigerung der Energieeffizienz von Sp
$Q_{Konvektion}$ = Jährliche Konvektionsabwärme:	16.000,00	kWh/a	$Q_{Konvektion} = Q_{Gesamt} \cdot (Q_{Hydraulik} + Q_{Werkzeug})$			Energiedienstleistung zur Steigerung der Energieeffizienz von Sp

Abbildung 6 Berechnungsgrundlagen zum Energiebedarf von Spritzgießmaschinen

5.2 Kühlung

Um eine effiziente und gleichzeitig energie- und damit kostensparende Kühlung für Spritzgießprozesse zu gewährleisten, ist es sinnvoll, die Hydraulikkühlung der Maschinen und die Werkzeugkühlung zu trennen. Die Trennung ist sinnvoll, da die benötigten Vorlauftemperaturen der beiden Kühlprozesse ein unterschiedliches Niveau haben. Während die Kühlwassertemperatur der Spritzgießwerkzeuge deutlich unter 20 °C liegen muss, um kurze Zykluszeiten zu ermöglichen, kann die Hydraulikkühlung moderner Spritzgießmaschinen ohne weiteres mit Kühlwassertemperaturen von 30 °C arbeiten.

Dies bedeutet, dass die erforderliche Kühlleistung für die Werkzeugkühlung in jedem Fall mit Kälteaggregaten erzeugt werden muss, um ganzjährig eine Kühlwasservorlauftemperatur von weniger als 20 °C zu gewährleisten. Für gewöhnlich werden die Werkzeuge daher mit Kompressionskältemaschinen gekühlt, welche mit einem elektrisch betriebenen Verdichter arbeiten. Diese Maschinen haben den Nachteil, dass der Verdichter einen hohen Energieverbrauch hat, welcher zu hohen Betriebskosten führt.

Während für die Werkzeugkühlung zumindest in den Sommermonaten eine Kompressionskältemaschine unverzichtbar ist, gibt es für die Hydraulikkühlung im Wesentlichen drei Alternativen, die zumindest teilweise ganzjährig eingesetzt werden können. Diese Alternativen sind:

- Trockenkühler
- Kühltürme
- Hybridkühlung

Diese drei Verfahren werden derzeit in der Kunststoffindustrie eingesetzt, wobei kontrovers darüber diskutiert wird, welches der Verfahren für die Kühlung der Maschinenhydraulik am besten geeignet sei. Daher soll im Folgenden ein Überblick über die Funktionsweise der drei Verfahren gegeben werden. Da die Maschinenkühlung derzeit mittels Kältemaschinen betrieben wird, erfolgt zudem eine Einführung in die Funktionsweise von Kompressionskältemaschinen.

5.2.1 Trockenkühler

Trockenkühler stellen die einfachste und damit auch günstigste Variante der Wasserrückkühlung dar. Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, durchläuft das von den Maschinen erwärmte Kühlwasser einen Wärmeaustauscher, der von der Umgebungsluft durchströmt wird.

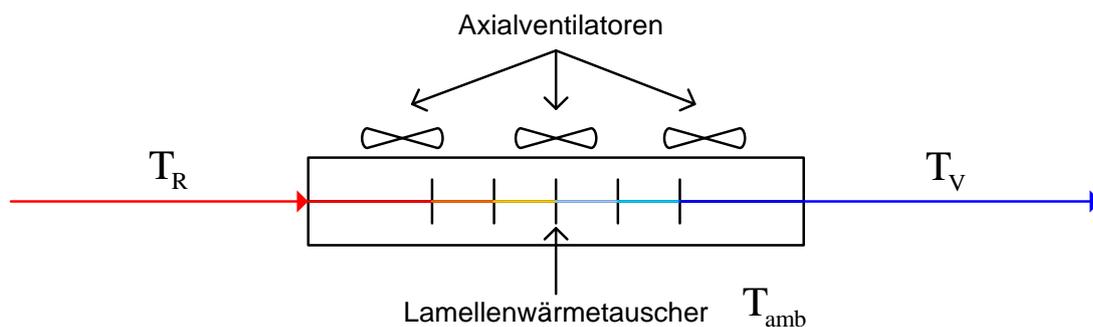


Abbildung 7 Funktionsschema eines Trockenkühlers

Die Kühlleistung eines Trockenkühlers lässt sich dabei mit folgender Gesetzmäßigkeit erfassen:

$$\dot{Q}_{TK} = k \cdot A \cdot \Delta T_M \quad (1)$$

Darin bedeuten:

\dot{Q}_{TK}	= Leistung des Trockenkühlers	[W]
k	= Wärmedurchgangszahl	[W/m ² · K]
A	= Oberfläche des Wärmetauschers	[m ²]
ΔT_M	= mittlere Temperaturdifferenz zwischen Kühlwasser und Luft	[K]

Der Bedarf an elektrischer Energie der Ventilatoren ist neben dem Energiebedarf der Betriebspumpe der einzige Kostenfaktor, den ein Trockenkühler im laufenden Betrieb verursacht.

Um den Energieverbrauch der Lüfter zu berechnen, muss zunächst die Luftmenge bekannt sein, die der Trockenkühler benötigt, um die Wärme abzuführen. Diese berechnet sich wie folgt:

$$\dot{m}_{Luft} = \frac{\dot{Q}_{TK}}{(T_{LA} - T_{LE}) \cdot c_L} \quad (2)$$

Darin bedeuten:

\dot{m}_{Luft}	= benötigter Luftmassenstrom	[kg/s]
T_{LA}	= Lufttemperatur am Austritt	[K]
T_{LE}	= Lufttemperatur am Eintritt	[K]
c_L	= spezifische Wärmekapazität der Luft	[J/kg · K]

Ist der Massestrom der Luft bekannt, lässt sich unter Verwendung von Gl. (3) die erforderliche Antriebsleistung des Lüfters bestimmen.

$$P = \frac{\dot{m}_L \cdot \Delta p}{\eta \cdot \rho_L} \quad (3)$$

Darin bedeuten:

P	= benötigte Antriebsleistung	[W]
Δp	= Druckverlust des Wärmetauschers	[N/m ²]
η	= Wirkungsgrad des Lüfters	[-]
ρ_L	= Dichte der Luft	[kg/m ³]

5.2.2 Kühltürme

Da Trockenkühler bei warmer Witterung schnell ihre Leistungsfähigkeit einbüßen, werden in der Kunststoffindustrie häufig Kühltürme eingesetzt. Kühltürme liefern in unseren Breitengraden auch während der warmen Jahreszeit eine ausreichende Kühlleistung, sofern die Vorlauftemperatur des Kühlwassers über 25°C liegen darf. Die im Vergleich zum Trockenkühler höhere Kühlleistung während der warmen Jahreszeit resultiert daher, dass ein kleiner Teil des umlaufenden Kühlwassers im Kühlturm verdunstet. Der Energiebedarf für diesen Phasenwechsel sorgt auch bei Umgebungstemperaturen von über 30°C für eine effektive Kühlung. Welche Vorlauftemperaturen mit einem Verdunstungskühlturm erreicht werden können hängt von der Feuchtkugeltemperatur (der Temperatur an einem befeuchteten Thermometer) ab. Diese beträgt in Deutschland während des Sommers ca. 20 °C. Ein gut ausgelegter Kühlturm kann diese Temperatur mit einer Abweichung von ca. 3K erreichen. Es sind also in Deutschland ganzjährig Vorlauftemperaturen von ca. 23 – 25 °C möglich.

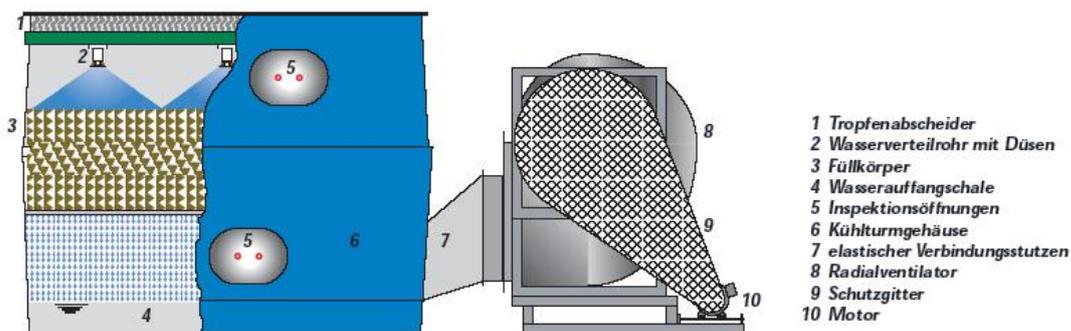


Abbildung 8 Schnittbild eines Gegenstrom-Verdunstungskühlturms mit Radialventilator⁵

Die Funktionsweise eines Verdunstungskühlturms lässt sich anhand der Abbildung 8 sehr gut nachvollziehen. Zunächst wird das zu kühlende Wasser durch ein Verteilsystem versprüht und über einem Füllkörper verrieselt. Dieser sorgt durch seine Form für eine hohe Verweilzeit des Wassers. Die Umgebungsluft wird im Gegenstrom vorbeigeführt, wodurch ein kleiner Teil des Wassers verdunstet. Die dafür erforderliche Energie wird dem Kühlwasser entzogen und erbringt den größten Anteil der Kühlleistung. Hinzu kommt die durch Konvektion von warmem Wasser an die kältere Luft erzeugte Kühlleistung. Das abgekühlte Wasser sammelt sich in einer Wasserauffangschale und wird den Kühlstellen erneut zugeleitet.

⁵ Berliner P. - S. 13

Die Leistungsfähigkeit eines Kühlturms ist von drei Faktoren abhängig, welche im Folgenden aufgeführt werden.

Eine wichtige Einflussgröße auf die Leistungsfähigkeit des Kühlturms ist der Wärmeübergang von der Wasseroberfläche auf die erwärmte Luft. Damit der Wärmeübergang hoch ist, muss die Wasseroberfläche möglichst groß sein. Eine große Wasseroberfläche wird durch den Einsatz eines Füllkörpers gewährleistet.

Ebenfalls von Bedeutung ist die Wasseraufnahmefähigkeit der Umgebungsluft. Je höher diese ist, desto mehr Verdunstungswasser kann gebunden werden. Die Wasseraufnahmefähigkeit der Luft wird üblicherweise in Form der relativen Luftfeuchtigkeit angegeben.

Der dritte Faktor mit Einfluss auf die Kühlturmleistung ist die den Kühlturm durchströmende Luftmenge. Die Luftmenge bestimmt neben der Luftfeuchtigkeit maßgeblich die Verdunstungsmenge des Kühlwassers und damit die Kühlleistung.

Die Betriebskosten eines Kühlturms werden neben Strombedarf der Betriebspumpe vor allem von dem benötigten Frischwasser verursacht, welches gebraucht wird um den Verdunstungsverlust auszugleichen. Zudem führt der Verlust des Kühlwassers dazu, dass das im Kühlkreislauf verbleibende Wasser mit der Zeit eindickt, da die im Wasser enthaltenen Salze bei der Verdunstung zurückbleiben. Diesem Eindicken kann man entweder auf chemischem Wege durch Wasserzusätze oder durch regelmäßiges Austauschen einer Teilmenge des Kühlwassers entgegenwirken, wobei für beide Varianten weitere, nicht unerhebliche Kosten anfallen. Analog zu den Trockenkühlern trägt zudem auch der Energiebedarf des Ventilators zu den Betriebskosten bei.

Die Betriebskostenberechnung eines Kühlturms ist im Vergleich zum Trockenkühler wesentlich aufwendiger. Dies liegt vor allem an dem Verdunstungsprozess. Um die benötigte Frischwassermenge zu ermitteln, muss zunächst unter Verwendung von Gl. (4) der benötigte Massestrom des Wassers ermittelt werden.

$$\dot{m}_W = \frac{\dot{Q}_K}{c_W \cdot (T_{KWE} - T_{KWA})} \quad (4)$$

Darin bedeuten:

\dot{Q}_K	= benötigte Kühlleistung	[W]
\dot{m}_W	= Massestrom des Wassers	[kg/s]
c_W	= spezifische Wärmekapazität des Wassers	[J/kg · K]
T_{KWE}	= Eintrittstemperatur des Kühlwassers	[K]
T_{KWA}	= Austrittstemperatur des Kühlwassers	[K]

Dazu werden die Kühlleistung und die Ein- und Austrittstemperatur des zu kühlenden Mediums benötigt. Ist der Massestrom des Wassers ermittelt, lässt sich unter Verwendung der Abbildung 9 der optimale Luftmassenstrom bestimmen.

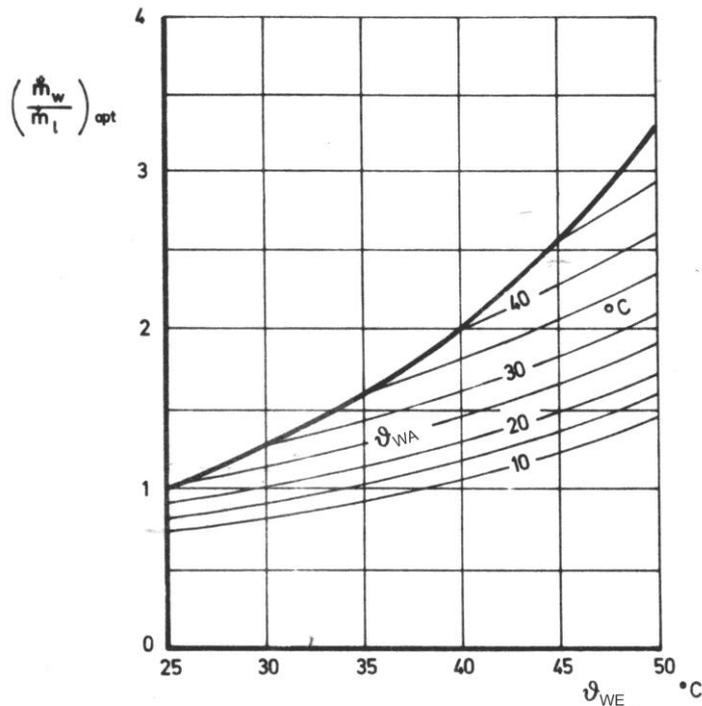


Abbildung 9 Diagramm zur Ermittlung des Luftmassenstromes bei gegebenem Kühlwasserstrom und gegebener Vor- und Rücklauf Temperatur des Kühlwassermassenstroms.⁶

Wenn der Luftmassenstrom bekannt ist, muss im nächsten Schritt festgestellt werden, wie hoch die absolute Luftfeuchtigkeit der Luft am Ein- und Austritt des Kühlturms ist. Der Wassergehalt der Luft unterliegt starken jahreszeitlichen Schwankungen. Für Deutschland ist in etwa von einer durchschnittlichen relativen Luftfeuchtigkeit von 75-80% auszugehen. Die für die Berechnung benötigte absolute Luftfeuchtigkeit des Zuluftstroms lässt sich bei gegebener Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit auf einfache Weise mit Hilfe eines Mollier-h, X-Diagramms (siehe Anhang) ermitteln. Um die absolute Luftfeuchtigkeit des Abluftstroms zu bestimmen, muss zunächst unter Verwendung der Gl. (5) die Enthalpie der Abluft bestimmt werden, wobei sich der für die Berechnung benötigte Enthalpiewert der Zuluft ebenfalls mit Hilfe des Mollier-h, X-Diagramms ermitteln lässt.

⁶ Berliner P. - S. 56

$$h_{L2} = h_{L1} + \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_L} \cdot c_w \cdot (T_{KWE} - T_{KWA}) \quad (5)$$

Darin bedeuten:

h_{L1} = Enthalpie der Zuluft [J/kg]

h_{L2} = Enthalpie der Abluft [J/kg]

Mit dem unter Verwendung von Gl. (5) ermittelten Enthalpiewert der Abluft sind die Zustandswerte der austretenden Luft noch nicht definiert. Sowohl die Temperatur als auch die absolute Luftfeuchtigkeit der Abluft sind also noch unbekannt. Da eine exakte Berechnung der absoluten Luftfeuchtigkeit sehr aufwendig wäre, wird für die weitere Berechnung davon ausgegangen, dass die Abluft vollständig gesättigt ist, sie also kein weiteres Wasser aufnehmen kann. Mit Hilfe dieser Annahme ist es nun wiederum unter Verwendung des Mollier-h, X-Diagramms auf einfache Weise möglich, die absolute Luftfeuchtigkeit der austretenden Luft zu bestimmen.

Sobald diese bekannt ist, lässt sich der Verdunstungsverlust des Kühlwassers wie folgt bestimmen:

$$\dot{m}_D = \dot{m}_L \cdot (x_2 - x_1) \quad (6)$$

Darin bedeuten:

\dot{m}_D = Massestrom des an den Luftstrom übertragenen Kühlwassers [kg/s]

x_1 = absolute Luftfeuchtigkeit der zugeführten Luft [kg/kg]

x_2 = absolute Luftfeuchtigkeit der abgeführten Luft [kg/kg]

Es soll an dieser Stelle nicht verschwiegen werden, dass der mit Gl. (6) bestimmte Wert für den Verdunstungswasserverlust lediglich ein angenäherter Wert ist. Der Grund für die Ungenauigkeit ist die Annahme, dass die austretende Luft vollkommen gesättigt ist, ihre relative Luftfeuchtigkeit also 100 % beträgt. Dies ist aber nicht immer der Fall. Die Luft kann den Kühlturm sowohl unterhalb als auch oberhalb der Sättigungsgrenze verlassen. Insbesondere der Fall der Übersättigung tritt häufig bei Kühltürmen mit natürlicher Lüftung auf, welche meist verwendet werden, um das Prozesswasser größerer Kraftwerke abzukühlen. Die Übersättigung wird dabei durch Nebelbildung über dem Kühlturm sichtbar. Im Gegensatz zu natürlich belüfteten Kühltürmen liegt die Abweichung bei zwangsbelüfteten Kühltürmen nur bei wenigen Prozent. Voraussetzung für eine geringe Abweichung der berechneten

absoluten Luftfeuchtigkeit vom tatsächlichen Wert ist allerdings die optimale Auslegung des Luftstromes, welche auf einfache Weise mit Hilfe der Abbildung 9 ermöglicht wird.

Neben den Kosten für das Frischwasser sind auch die Stromkosten des Lüfters und die Kosten der Kühlwasseraufbereitung gewichtige Betriebskostenfaktoren eines Kühlturms. Die benötigte Antriebsleistung des Lüfters wird dabei analog zum Trockenkühler unter Verwendung von Gl. (3) bestimmt.

Um die Kosten der Kühlwasseraufbereitung zu erfassen, wird im Folgenden davon ausgegangen, dass die mit Gl. (6) berechnete Wassermenge verdreifacht werden.⁷

5.2.3 Hybridkühler

Eine Alternative, die die Vorteile beider Konzepte in Einklang bringt und die Nachteile weitgehend vermeidet, stellt die Hybridkühlung dar. Ein Hybridkühler ist zunächst ein gewöhnlicher Trockenkühler. Bei Außentemperaturen von über 25 °C wird jedoch unterhalb des Lamellenwärmetauschers Frischwasser in die angesaugte Zuluft eingebracht (siehe Abbildung 10).

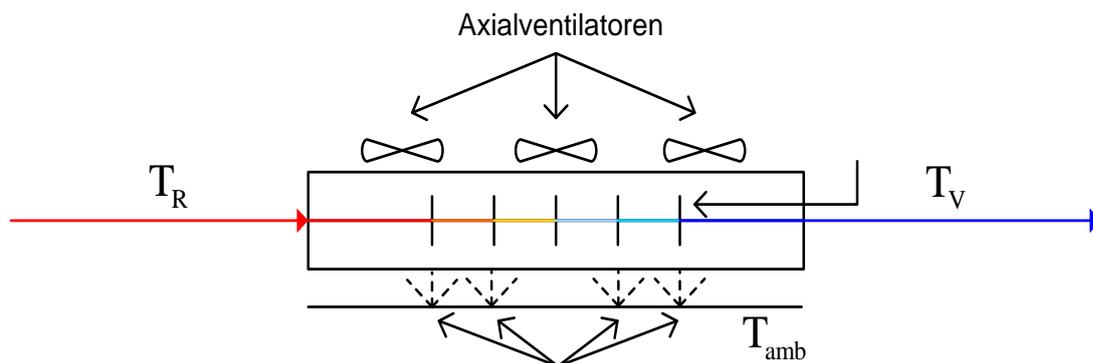


Abbildung 10 Funktionsschema eines Hybridkühlers

Ähnlich wie bei einem Kühlturm verdunstet das eingebrachte Wasser, wobei im Unterschied zum Kühlturm das Wasser vollständig verdunsten muss. Da der Phasenwechsel des Wassers Energie benötigt, die er aus der Zuluft erhält, wird diese abgekühlt. Die Temperatur der Luft wird dabei von der Feuchtkugeltemperatur bestimmt. Da das Kühlwasser im Gegensatz zum Kühlturm keinen direkten Kontakt zur zugeführten Luft hat, liegt die mit einem Hybridkühler erreichbare Vorlauftemperatur um ca. 5 K höher als die eines Kühlturms. In unseren

⁷ Cube

Breitengraden ist also mit einem Hybridkühler während der Sommermonate eine Vorlauftemperatur von ca. 30 °C realisierbar. Diese Vorlauftemperatur stellt für die Hydraulik moderner Spritzgießmaschinen kein Problem dar, ein evtl. Produktionsausfall ist also nicht zu befürchten.

Da das Frischwasser nur bei Außentemperaturen über 25 °C benötigt wird, benötigt ein Hybridkühler im Vergleich zum Kühlturm wesentlich weniger Wasser. Daher sind die Betriebskosten eines Hybridkühlers deutlich geringer als die eines Kühlturms.

Trotz ihrer Vorteile sind Hybridkühlsysteme sehr umstritten. Die Skepsis vieler Firmen ist durchaus berechtigt, da die korrekte Auslegung eines vermeintlich simplen Hybridkühlers überaus anspruchsvoll ist. Das Problem bei der Auslegung besteht darin, die zuzuführende Wassermenge exakt zu bestimmen. Wird zu wenig Wasser zugeführt, ist die Kühlleistung nicht ausreichend. Wird jedoch zu viel Wasser zugeführt, erreicht ein Teil des Wassers die Lamellen des Wärmetauschers bevor es verdunstet. In diesem Fall setzt sich das Wasser zunächst an den Lamellen ab. Bei dem anschließenden Verdunstungsvorgang bleiben dann die im Wasser enthaltenen Feststoffe wie z.B. Kalk und Schmutz an den Lamellen zurück. Diese Rückstände führen erfahrungsgemäß innerhalb kurzer Zeit zu einem Totalausfall des Hybridkühlers. Es ist zudem nicht möglich, die einmal verschmutzten Lamellen wieder zu reinigen, da die Ablagerungen so hart sind, dass es bei dem Versuch, sie zu entfernen, in jedem Fall zu irreparablen Schäden an den Lamellen kommen würde.

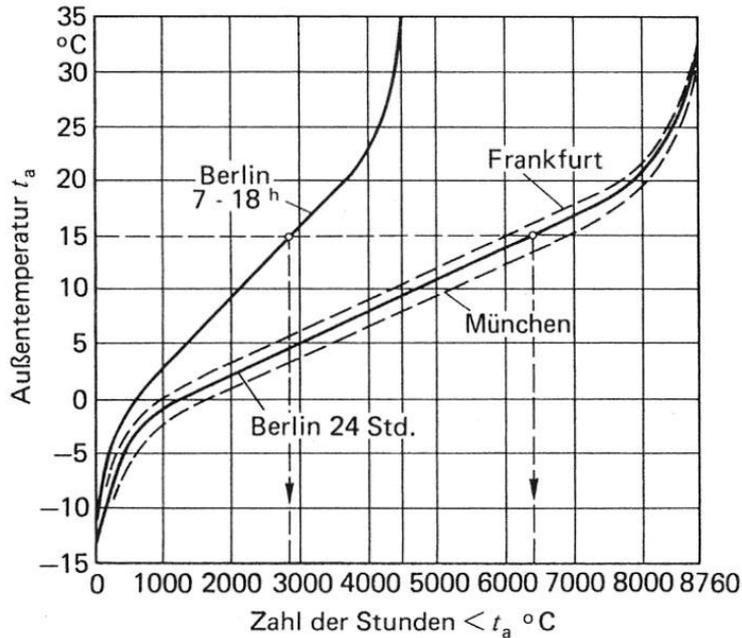


Abbildung 11 Summenhäufigkeit der Außentemperatur⁸

Die Betriebskosten eines Hybridkühlers berechnen sich zunächst wie die eines Trockenkühlers. Hinzu kommen lediglich die Kosten des bei Umgebungstemperaturen über 25 °C benötigten Frischwassers, wobei die Berechnung aufgrund der konstanten Frischwassermenge unproblematisch ist. Die Anzahl der Stunden, in denen die Temperatur der Umgebungsluft über 25 °C liegt, kann z.B. mit Hilfe der Abbildung 11 relativ genau bestimmt werden.

5.2.4 Kompressionskältemaschinen

Kompressionskältemaschinen sind in der Lage, ganzjährig konstant niedrige Vorlauftemperaturen zu gewährleisten. Diese Leistungsfähigkeit wird durch den Einsatz von Kältemitteln möglich, welche die Eigenschaft haben bereits bei sehr niedrigen Temperaturen zu verdampfen und dabei Wärme zu binden.

⁸ Recknagel, H.; Sprenger, E.; Schramek, E.-R. - S.11

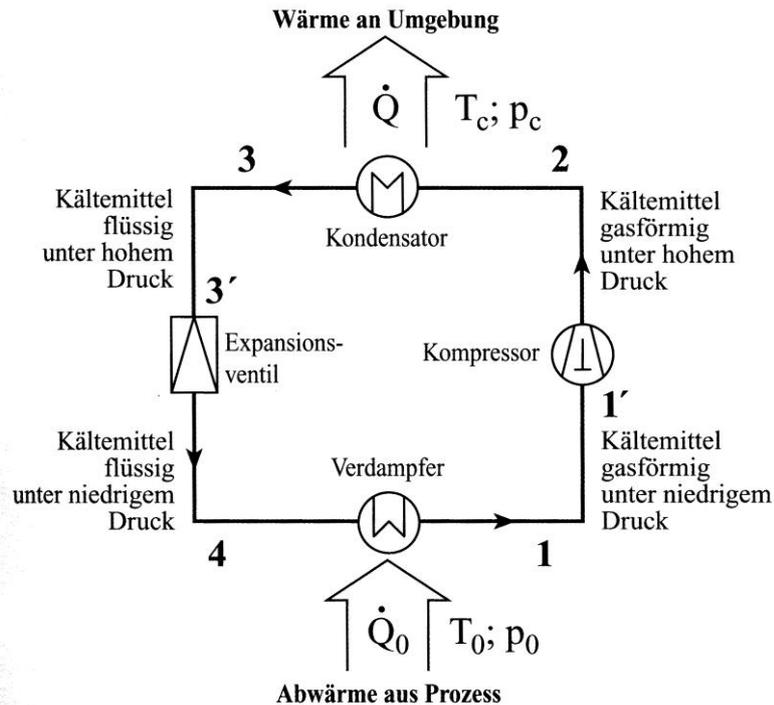


Abbildung 12 Funktionsschema einer Kältemaschine⁹

Abbildung 12 zeigt das Funktionsschema einer Kompressionskältemaschine.

Die Betriebskosten einer Kompressionskältemaschine werden vom Leistungsbedarf des Verdichters und des Kondensatorlüfters bestimmt. Um die Betriebskosten für einen vorgegebenen Betriebspunkt zu berechnen, müssten folgende Kennwerte bekannt sein:

1. die benötigte Kühlleistung
2. die gewünschte Vor- und Rücklauftemperatur des Kühlwassers
3. die Umgebungstemperatur
4. die Verdampfungs- und Kondensationstemperatur des Kältemittels
5. der Gesamtwirkungsgrad des Verdichters
6. der Gesamtwirkungsgrad der Lüfter
7. der Druckverlust des Kondensators

Sind die Kennwerte bekannt, wird der Kreisprozess in ein logarithmisches p, h -Diagramm eingetragen. Das $\lg p, h$ -Diagramm ermöglicht es, den direkten Zusammenhang zwischen

⁹ Reisner, K. - S. 37

Druck, Enthalpie und Temperatur grafisch darzustellen. Daher lässt sich der theoretische Energiebedarf mit einem lg p,h-Diagramm einfach ermitteln. Dazu wird auf der Ordinate der Druck und auf der Abszisse die Enthalpie eingetragen. Um auch größere Druckdifferenzen abzubilden, wird der Druck logarithmisch dargestellt. Die Zusammenhänge zwischen den Zustandsgrößen sind vom verwendeten Kältemittel abhängig, daher muss für jedes Kältemittel ein spezielles lg p, h-Diagramm verwendet werden. Abbildung 13 zeigt ein lg p, h-Diagramm für das Kältemittel R-134a, welches häufig eingesetzt wird, da es relativ umweltverträglich ist.

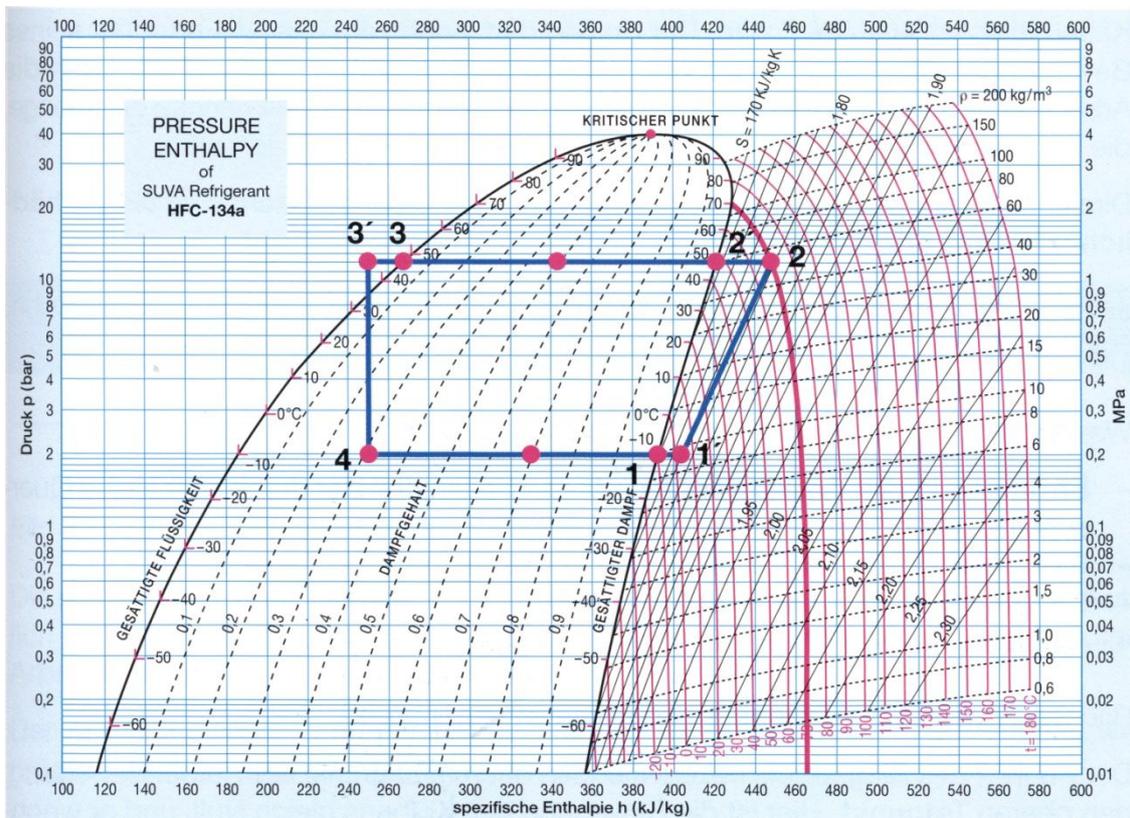


Abbildung 13 lg p, h-Diagramm mit eingezeichnetem Kreisprozess für das Kältemittel R134a¹⁰

Es hat sich gezeigt, dass diese Informationen in kaum einem Betrieb direkt verfügbar sind. Aufgrund dessen wurde für die Berechnung des Energiebedarfs auf die einfachere Formel:

$$P_{\text{eff}} = \frac{\dot{W}}{\eta} \quad (7)$$

Darin bedeuten:

¹⁰ Reisner, K. - S. 55

P_{eff} = effektive Leistungsaufnahme des Verdichters [W]

η = Wirkungsgrad des Verdichters [-]

Die Leistungszahl (COP) des Verdichters kann entweder direkt vom Hersteller der Kältemaschine erfragt werden, oder aber aus der Eurovent¹¹ Datenbank für bestimmte Kältemaschinen abgerufen werden. Die Eurovent Datenbank bestimmt die Leistungszahl der Kältemaschinen nach einem definierten Prüfverfahren, das ähnlich dem Normverbrauch im Automobilsektor, Teillast- und Vollastverhalten berücksichtigt.

Unter zugrundelegen der Daten aus der Eurovent-Datenbank wurde eine Berechnungsformel für die Abhängigkeit der Leistungszahl (COP) und der Außentemperatur bestimmt. Abbildung 14 zeigt diesen Zusammenhang.

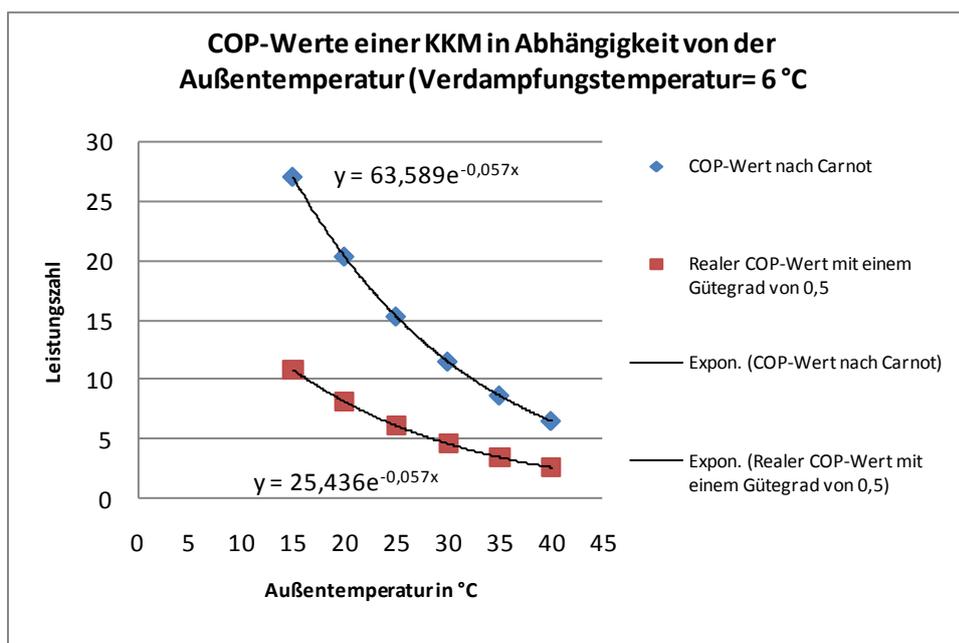


Abbildung 14 Abhängigkeit des COP von der Außentemperatur (eigene Darstellung)

Wichtig ist hierbei die Änderung und nicht der absolute Wert. Mit dieser Formel lässt sich ein vom Hersteller bereitgestellter COP auf verschiedene Außentemperaturbedingungen umrechnen. Die Außentemperaturen werden über den Standort, der vom Benutzer vorgegeben wird, ermittelt. Somit ist es möglich mit wenigen Informationen, den Energiebedarf der Kältemaschine zu bestimmen.

¹¹ <http://www.eurovent-certification.com/>

6 Bestimmung der Investitionskosten

Neben der Berechnung der Energiekosten werden zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit auch die Investitionskosten bzw. die Mehrkosten bei unterschiedlichen Technologien benötigt.

Hier wurde auf den Preisatlas des IUTA¹² zurückgegriffen. Diese Berechnungsvorschriften ermöglichen es die Investitionskosten für die Anlagen, aufgrund der benötigten Leistung zu bestimmen.

Wasserkühlsatz

Einheit	Kostenfunktion	Geltungsbereich
€/kW _{Kälte}	$k = 4.991,3436 \cdot Q \text{ [kW]}^{-0,6794} + 179,63$	10 ≤ Q ≤ 10000kW

Trockenkühler

Einheit	Kostenfunktion (Dreieck-Schaltung)	Geltungsbereich
€/kW _{Kälte}	$K = 37,419 \cdot Q \text{ [kW]} + 312,93$	

Hybridkühler

Einheit	Kostenfunktion	Geltungsbereich
€/kW _{Kälte}	$K = 0,625 \cdot (46,169 \cdot Q \text{ [kW]} + 525,02)$	

Kühlturm

Einheit	Kostenfunktion	Geltungsbereich
€/kW _{Kälte}	$K = 2.348,2 \cdot Q \text{ [kW]}^{-1,0398} + 26,15$	50 bis 1200 kW

¹² Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA)

7 Umsetzung des Prototypen

Ausgehend von den theoretischen Berechnungsgrundlagen wurden Entscheidungsbäume entwickelt, die das Grundgerüst für die Software bilden.

Am Beispiel der Spritzgießtechnik ist einer dieser Bäume in Abbildung 15 dargestellt.

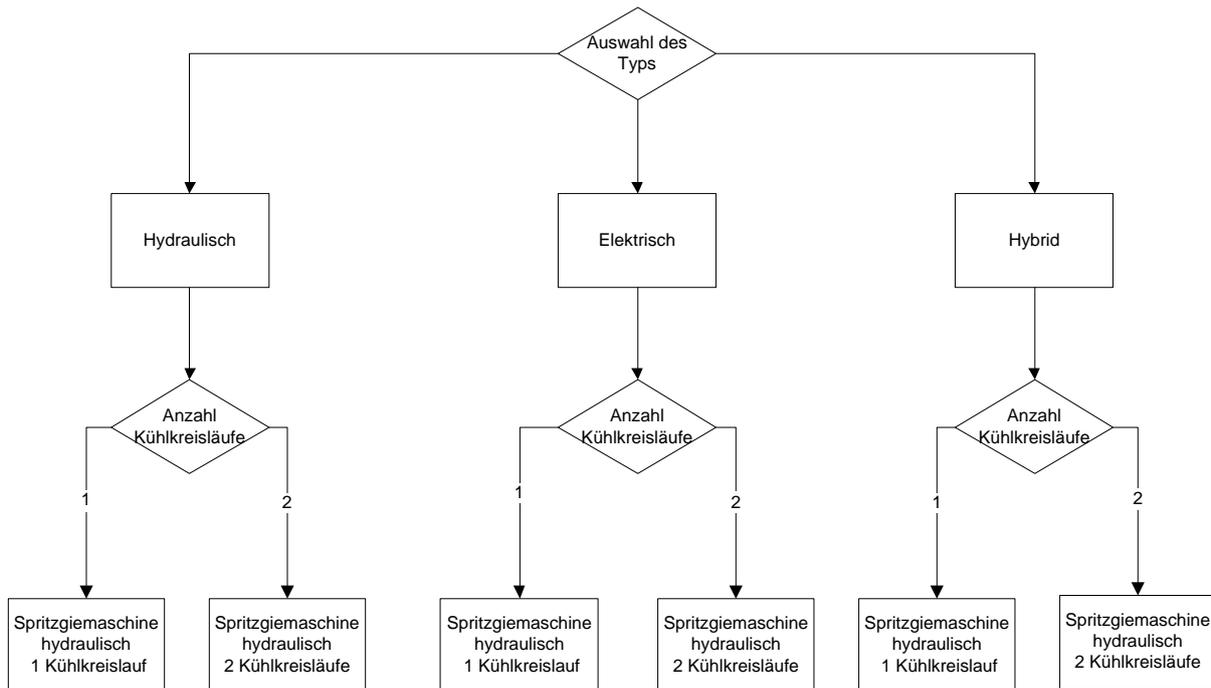


Abbildung 15 Entscheidungsbaum Spritzgießprozess

Der Benutzer wählt zuerst die Antriebsart der Maschine aus, anschließend werden ihm Fragen zur Anbindung der Kühlkreisläufe gestellt.

Entsprechend der Eingaben des Benutzers werden ihm im Folgenden unterschiedliche Fragen zur verwendeten Technik gestellt.

Ist nur ein Kühlkreislauf vorhanden wird mit dem Entscheidungsbaum in Abbildung 16 fortgefahren. Hier gibt der Benutzer an, welche Rückkühltechnik zum Einsatz kommt, er hat im gezeigten Beispiel die Möglichkeit zwischen den Varianten: Kühlturm, Trockenkühler oder Hybridkühler auszuwählen.

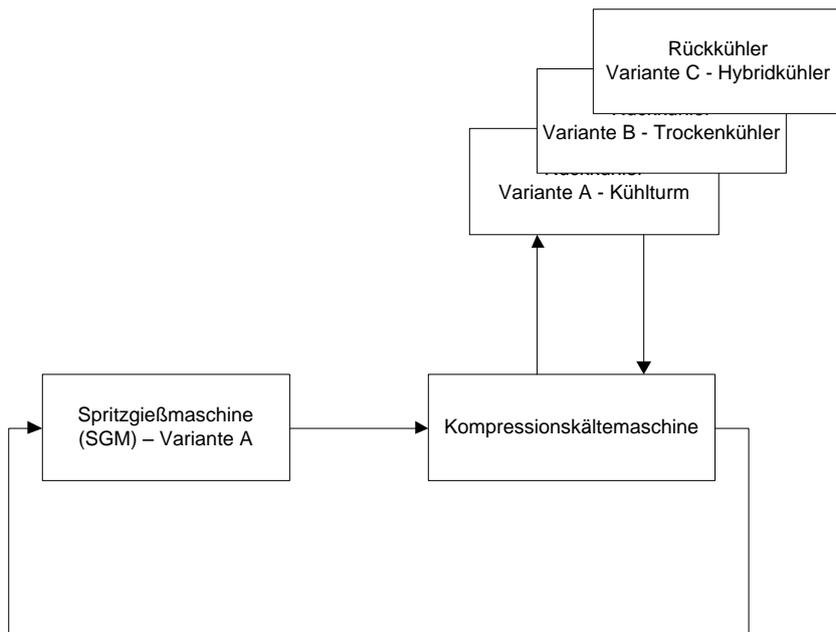


Abbildung 16 Entscheidungsbaum für einen Kühlkreislauf

Sollte ein zweiter Kühlkreislauf vorhanden sein, so kann der Benutzer auch für diesen die verwendete Kühltechnik auswählen (Abbildung 17).

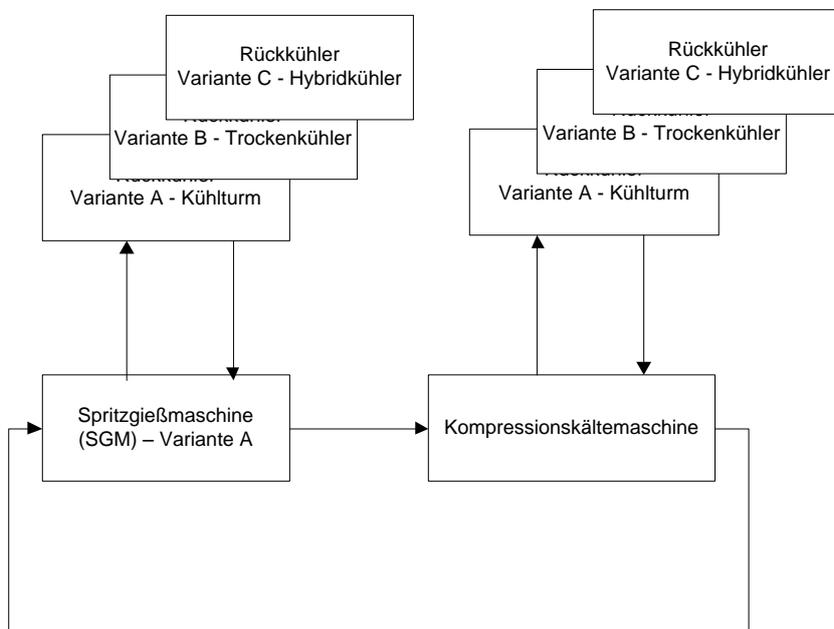


Abbildung 17 Entscheidungsbaum für zwei Kühlkreisläufe

In Abbildung 18 ist die Eingabemaske hierfür zu sehen. Neben den bereits erwähnten Angaben, werden weiter Informationen wie z. B. Vor- und Rücklauftemperaturen benötigt.

Bei der Auswahl der benötigten Informationen wurde darauf Wert gelegt, dass diese entweder im Betrieb bekannt sind oder durch einfache Messungen ermittelt werden können.

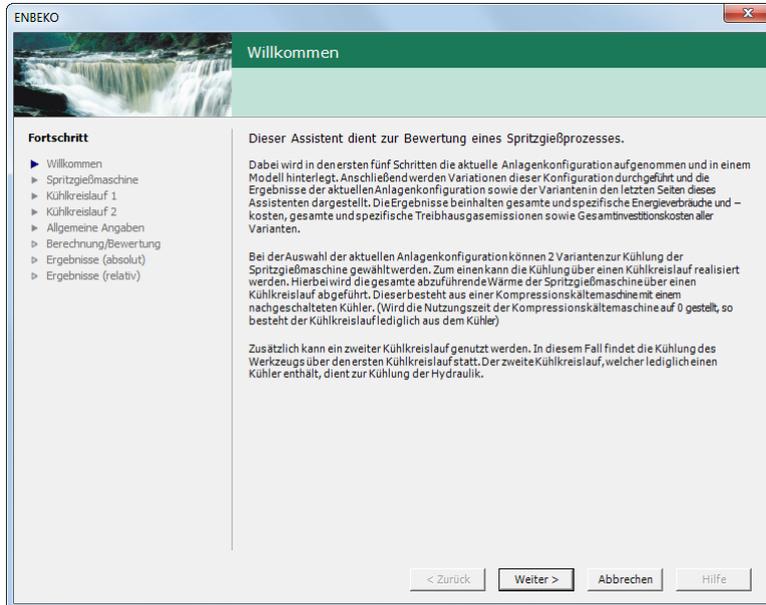


Abbildung 18 Assistent zur Eingabe des Prozesses

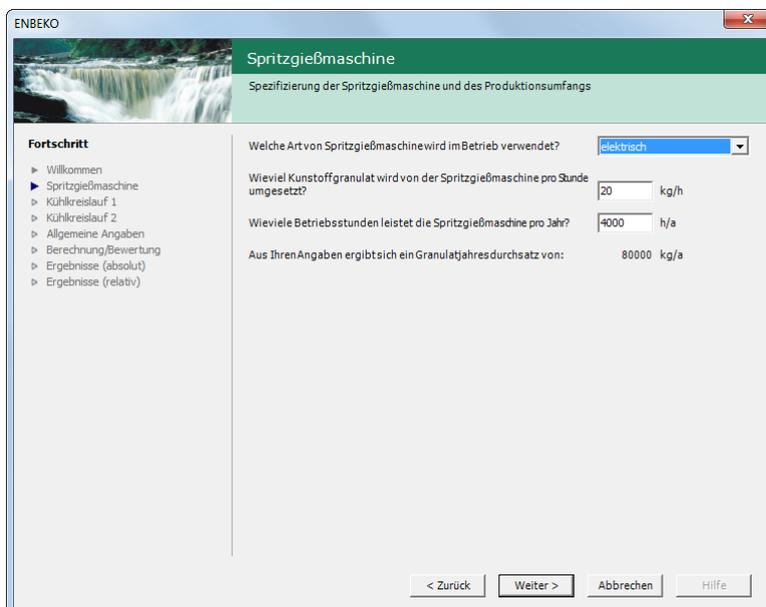


Abbildung 19 Eingabemaske zur Spritzgießmaschine

ENBEKO

Kühlkreislauf 1

Spezifizieren Sie auf dieser Seite den Kühlkreislauf 1

Fortschritt

- ▶ Willkommen
- ▶ Spritzgießmaschine
- ▶ Kühlkreislauf 1
- ▶ Kühlkreislauf 2
- ▶ Allgemeine Angaben
- ▶ Berechnung/Bewertung
- ▶ Ergebnisse (absolut)
- ▶ Ergebnisse (relativ)

Kühlkreislauf 1

Kühlkreislauf 1 übernimmt entweder die komplette Kühlung der Spritzgießmaschine oder bei Verwendung eines zweiten Kühlkreislaufes lediglich die Werkzeugkühlung.

Wie hoch ist die Vorlauftemperatur des Kühlkreislaufes bei Eintritt in die Spritzmaschine? °C

Wie hoch ist die Rücklauftemperatur des Kühlkreislaufes beim Verlassen der Spritzgießmaschine? °C

Wie hoch ist die Leistungszahl (COP) der genutzten Kompressionskältemaschine? -

Wieviele Monate im Jahr wird die Kompressionskältemaschine genutzt? Monate

Welche Art der Rückkühlung wird verwendet?

Wie hoch ist die Vorlauftemperatur des Rückkühlkreislaufes bei Eintritt in die Kompressionskältemaschine? °C

Wie hoch ist die Rücklauftemperatur des Rückkühlkreislaufes beim Verlassen der Kompressionskältemaschine? °C

Abbildung 20 Eingabemaske für den Kühlkreislauf 1

ENBEKO

Kühlkreislauf 2

Spezifizieren Sie auf dieser Seite den Kühlkreislauf 2

Fortschritt

- ▶ Willkommen
- ▶ Spritzgießmaschine
- ▶ Kühlkreislauf 1
- ▶ Kühlkreislauf 2
- ▶ Allgemeine Angaben
- ▶ Berechnung/Bewertung
- ▶ Ergebnisse (absolut)
- ▶ Ergebnisse (relativ)

Kühlkreislauf 2

Kühlkreislauf 2 übernimmt die Hydraulikkühlung

Wie hoch ist die Vorlauftemperatur des Kühlkreislaufes 2 bei Eintritt in die Spritzmaschine? °C

Wie hoch ist die Rücklauftemperatur des Kühlkreislaufes 2 beim Verlassen der Spritzgießmaschine? °C

Welche Art der Rückkühlung wird verwendet?

Abbildung 21 Eingabemaske für den Kühlkreislauf 2

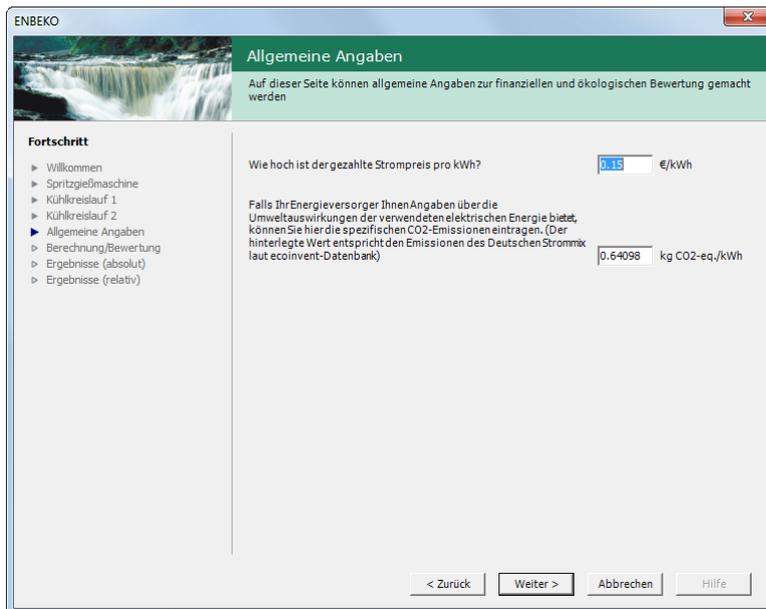


Abbildung 22 Eingabemaske zur wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung

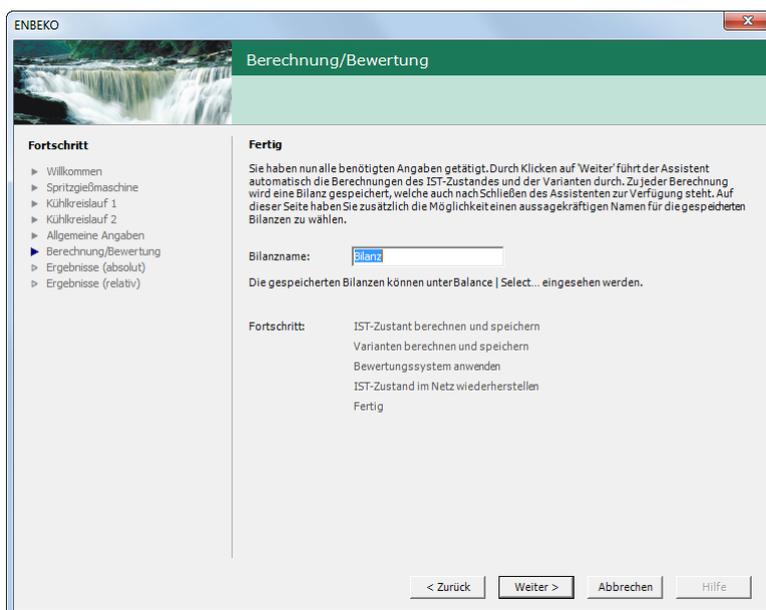


Abbildung 23 Eingabemaske Ende

Aus den Daten, die vom Assistenten abgefragt wurden, erstellt die Software ein Prozessabbild, in dem die einzelnen Prozesse energetisch miteinander verknüpft werden (Abbildung 24). Dieses Modell stellt die Grundlage für die weiteren Berechnungen dar.

Spritzgießmaschine (SGM) mit Kompressionskältemaschine (KKM) und Kühlwerken (Jahreswerte)

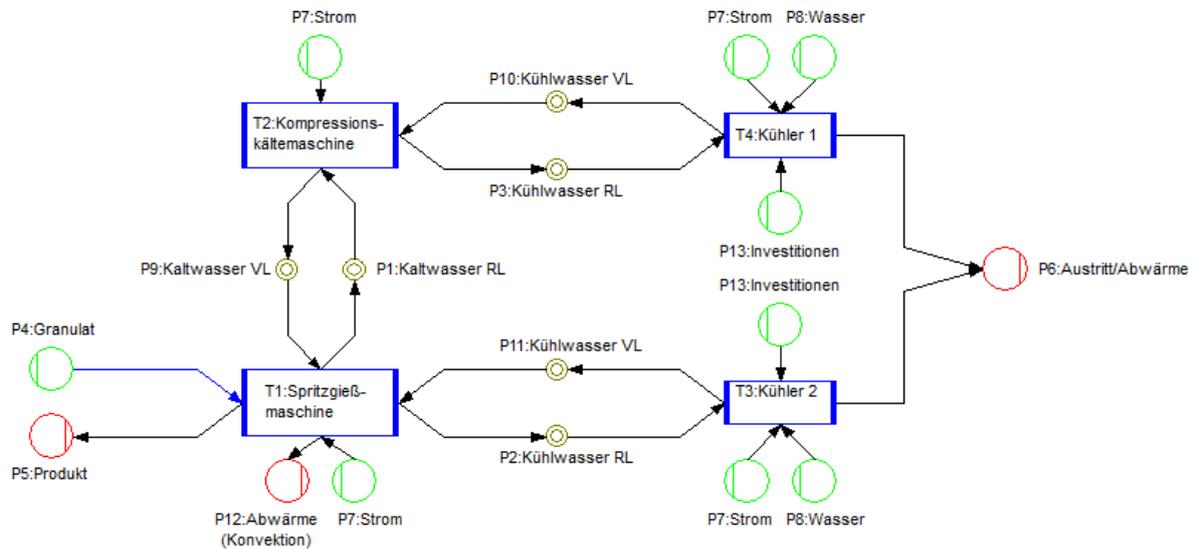


Abbildung 24 Screenshot des physikalischen Prozesses als Modell in der Software

Der Energiebedarf der gesamten Prozesskette wird im Anschluss bestimmt und in Form eines Energieflussdiagramms (siehe Abbildung 25) dargestellt. Dieses Sankey-Diagramm veranschaulicht dem Benutzer an welcher Stelle und in welcher Größenordnung Energie benötigt wird und für andere Prozesse als Abfallprodukt zu Verfügung steht.

Spritzgießmaschine (SGM) mit Kompressionskältemaschine (KKM) und Kühlwerken (Jahreswerte)

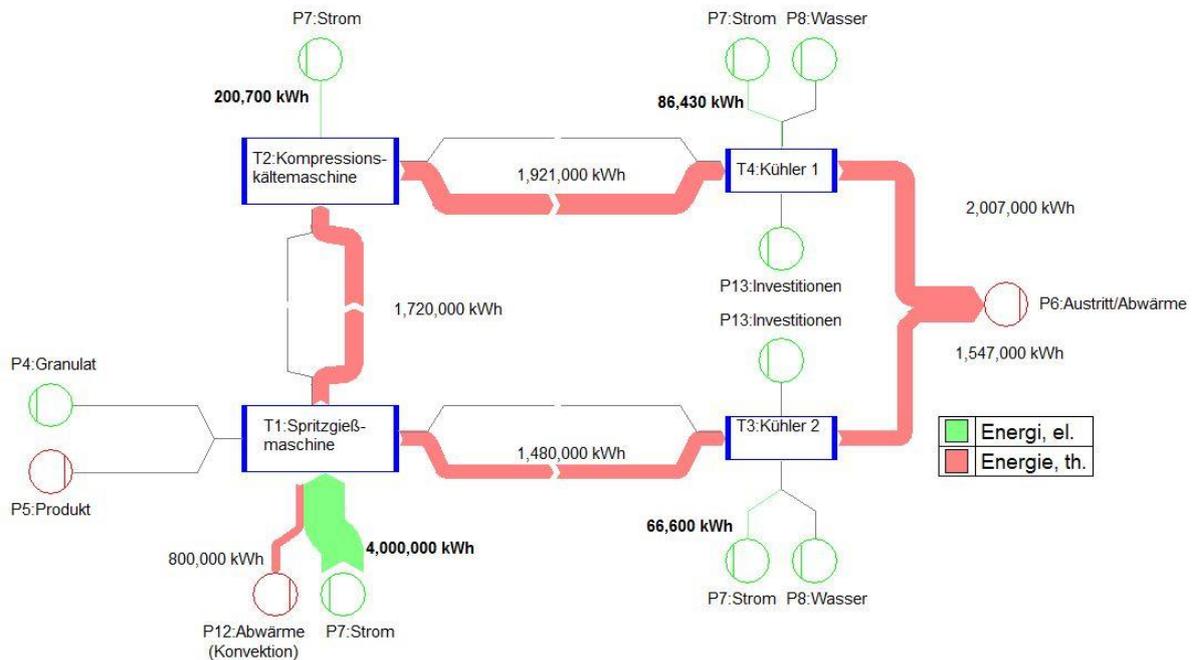


Abbildung 25 Screenshot aus dem Prototyp zur Darstellung der Energieflüsse

Im nächsten Schritt werden mögliche Optimierungsmaßnahmen von der Software berechnet. Hierzu werden die möglichen Alternativen in der Software und deren Energiebedarf im Verhältnis zu dem Ist-Stand bestimmt.

Die Maßnahmen stammen aus einer zentralen Maßnahmendatenbank. Aus verschiedenen Quellen konnten hierbei Maßnahmen zur Energieeinsparung hinzugefügt werden: Erfahrungen aus durchgeführten Projekten, Informationen aus Fachbüchern, Fachzeitschriften und anderen wissenschaftlichen Quellen. Die folgende Abbildung zeigt einen kurzen Auszug aus der Maßnahmendatenbank.

Bereich	IST-STAND	SOLL-STAND	Erläuterung / Faustformel	Quelle 1	Quelle 2
Wärmedämmung		Wärmedämmung von Wänden, Türen und Toren	überprüfen und gegebenenfalls durch Nachisolierung verbessern		
Wärmedämmung		Ungedämmte Saug- und Druckleitungen vom Verdampfer zum Kondensator unbedingt dämmen	Erwärmung des Sauggases um 1K ergibt bis zu 3 % mehr Leistungsbedarf	X	
Quelle		Kaltes Grundwasser nutzen		X	
WRG		Sorptionsprozess verwenden	Abwärme aus dem Prozess weiternutzen		
Regelung		Kühlstellenregelung einführen	Regelung soll nicht sofort auf jeden Luftaustausch reagieren (z.B. Öffnen der Tür)		
Steuerung		FU beim Verdichter verwenden			
Kältemittel		optimales Kältemittel	Je kleiner die Temperaturdifferenz zwischen Verdampfung und Kondensation, desto geringer ist die Druckdifferenz, die vom Verdichter überwunden werden muss und somit der Energieaufwand für den Betrieb der Anlage. Für eine um 1°C höhere Verdampfungstemperatur wird der Energieaufwand am Verdichter um etwa 4 % gesenkt. Bei einer konstanten Kühlleistung muss bei der Erhöhung der Verdampfungstemperatur der Luftdurchsatz an den Verdampfern erhöht werden. Dies wird realisiert durch höhere Luftgeschwindigkeiten, die auch wiederum einen erhöhten Energieaufwand bedeuten, oder durch größere Tauscherflächen, die demgegenüber mit höheren Investitionskosten verbunden sind. Es muss also ein Optimum zwischen den Betriebs- und Investitionskosten gefunden werden.	X	
Einstellung		Kondensationstemperatur herabsetzen	Analog zur Verdampferauslegung bewirkt die Absenkung der Kondensationstemperatur um 1°C eine Reduzierung des Verdichterenergiebedarfs um ca. 3 %.	X	
WRG		Nutzung von kaltem Grundwasser	Dies ist bei einem Kühltemperaturniveau oberhalb von 12°C in der Regel die energiesparendste Variante	X	
Kälteerzeugung		Absorptionskälteanlagen	Hier wird für den Kühlprozess Wärme zugeführt und nur wenig elektrische Energie benötigt. Das Verfahren beruht auf der Trennung eines Gemischs aus einem Kältemittel und einem Lösemittel durch Wärmezufuhr.	X	
Kälteerzeugung		Absorptionskälteanlagen	Im Normalkühlbereich werden die Stoffpaare Wasser und Lithium-Bromid sowie im Tiefkühlbereich Ammoniak und Wasser eingesetzt. Diese Variante bietet sich z. B. an, wenn zu Zeiten des Kühlbedarfs erhebliche Abwärmemengen von mindestens 75°C zur Verfügung stehen. Absorptionskälteanlagen, die z.B. mit Abwärme oder Solaranlagen betrieben werden können, sind in den Betriebskosten bis zu 70 % günstiger als ausschließlich strombasierte Kälteanlagen.	X	

Abbildung 26 Auszug aus der internen Maßnahmendatenbank

Für das aufgezeigte Beispiel bedeutet dies, dass verschiedene Kühlmaßnahmen durch die Software bilanziert werden. Hierbei greift die Software auf die in Kapitel 6 beschriebenen Entscheidungsbäume zurück und entwickelt auf deren Basis verschiedene alternative Maßnahmen. Diese Maßnahmen werden energetisch bewertet und anschließend dem Benutzer als TOP-Maßnahmenliste dargestellt.

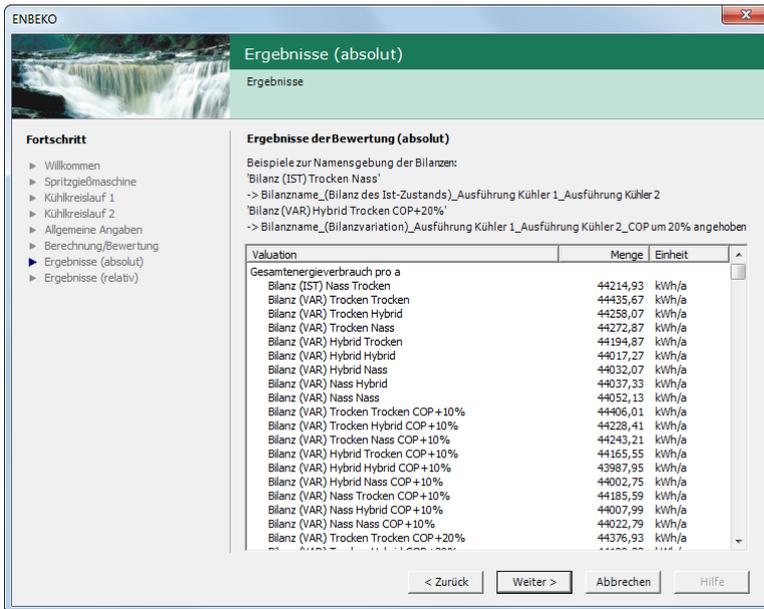


Abbildung 27 Darstellung der Optimierungspotenziale als Maßnahmenkatalog

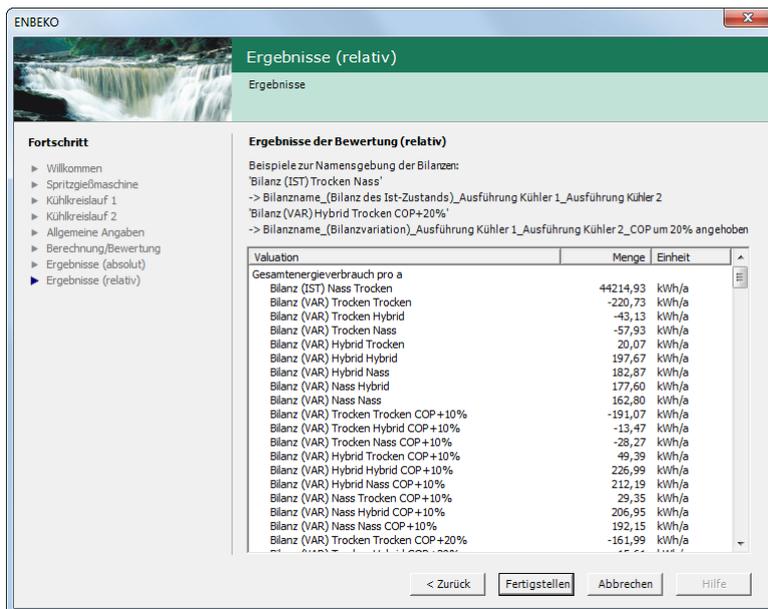


Abbildung 28 Darstellung der Einsparungspotenziale als Maßnahmenkatalog

Zusätzlich werden die Investitionskosten für die Maßnahme berücksichtigt und die Amortisationszeit berechnet.

Ergebnisse (relativ)

Ergebnisse

Fortschritt

- Willkommen
- Spritzgießmaschine
- Kühlkreislauf 1
- Kühlkreislauf 2
- Allgemeine Angaben
- Berechnung/Bewertung
- Ergebnisse (absolut)
- Ergebnisse (relativ)**

Ergebnisse der Bewertung (relativ)

Beispiele zur Namensgebung der Bilanzen:
 'Bilanz (IST) Trocken Nass'
 -> Bilanzname_(Bilanz des Ist-Zustands)_Ausführung Kühler 1_Ausführung Kühler 2
 'Bilanz (VAR) Hybrid Trocken COP+20%'
 -> Bilanzname_(Bilanzvariation)_Ausführung Kühler 1_Ausführung Kühler 2_COP um 20% angehoben

Maßnahme	Energieeinsparung in kWh/a	Kosteneinsparung in €/a
Austausch der hydraulischen SGM durch eine elektrische SGM	1.200.000,00 €	144.000,00 €
Austausch der hydraulischen SGM durch eine hybride SGM	600.000,00 €	72.000,00 €
Aufteilung der Kühlkreisläufe Trockenkühler+Hybridkühler	38.100,00 €	4.572,00 €
Aufteilung der Kühlkreisläufe Hybridkühler+Hybridkühler	38.100,00 €	4.572,00 €
Aufteilung der Kühlkreisläufe Hybridkühler+Trockenkühler	36.600,00 €	4.392,00 €
Rückkühlung der KKM über Hybridkühler	33.000,00 €	3.960,00 €
Aufteilung der Kühlkreisläufe Trockenkühler+Trockenkühler	30.800,00 €	3.696,00 €
Rückkühlung der KKM über Trockenkühler	30.000,00 €	3.600,00 €
Aufteilung der Kühlkreisläufe in zwei Systeme und Einsatz eines Hybridkühlers	21.600,00 €	2.592,00 €
Aufteilung der Kühlkreisläufe in zwei Systeme und Einsatz eines Trockenkühlers	15.800,00 €	1.896,00 €

< Zurück Fertigstellen Abbrechen Hilfe

Abbildung 29 Darstellung der sortierten Einsparungspotenziale

Die bewerteten Ergebnisse werden, wie in Abbildung 29 dargestellt, gelistet. Zu den Bewertungskriterien zählen u.a. Energie-, Kosten, CO₂-Einsparung oder auch Amortisationszeit. Die Sortierung beginnt hier mit der größten Energie- bzw. Kosteneinsparung.

Der Anwender erhält dadurch eine Maßnahmenliste, die das ökologische und wirtschaftliche Einsparungspotenzial darlegt. Diese Liste ist sortiert und erlaubt dem Nutzer methodisch die beste (ökologisch / ökonomisch) Maßnahme zu identifizieren. Diese dient dabei als Hitliste, die vom Nutzer von oben nach unten abgearbeitet werden kann.

Er erhält also eine methodische Vorgehensweise, die es ihm erlaubt aus einer Vielzahl an Maßnahmen automatisiert, die Maßnahmen umzusetzen, die den meisten Nutzen bringen. Aufgrund dieser Vorgehensweise kann ein Unternehmen viel schneller und gezielter Maßnahmen umsetzen, die zur Energie- und CO₂-Einsparung beitragen.

8 Erkenntnisse

Zielsetzung des Projektes war es eine Methode zu entwickeln, die es den Verantwortlichen in den Unternehmen erlaubt, ohne großen Aufwand und ohne tiefes Wissen über den Energiebedarf ihrer Anlagen, die energetischen Einsparpotenziale aufzudecken und Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt zu bekommen.

Die Verantwortlichen sollen über eine einfache Bedienoberfläche mit Hilfe eines Assistenten durch die Abbildung ihrer Prozesse zu dem energetischen Modell ihrer Anlagen geführt werden.

Dieses konnte aus Sicht der Projektbeteiligten realisiert werden. Für den Anwendungsfall des Spritzgießens hat sich gezeigt, dass der Prozess, obwohl er sehr unterschiedlich ausgeführt sein kann, in einzelne Teilprozesse (Maschine, Kühlung, Anzahl Kühlkreisläufe) zerlegt werden kann. Der Energiebedarf dieser Prozesse lässt sich wiederum durch mathematische Formeln, die mit relativ wenigen Eingabeparametern auskommen, bestimmen.

Durch das Abfragen der notwendigen Parameter über einen interaktiven Assistenten, der je nach Auswahl weitere Abfragen vornimmt, wird der Benutzer sehr zielstrebig durch den Abfrageprozess geleitet.

Die anschließende Darstellung des Prozesses in einem Sankey-Diagramm ermöglicht es zudem die Hauptenergieverbraucher schnell zu erfassen. Dies gilt insbesondere für Personen, deren Hauptaugenmerk nicht auf dem Energiebedarf der Anlagen, sondern eher auf dem Produktionsablauf liegt. Der Informationsgewinn ist bei den Beteiligten durch diese Darstellungen sehr hoch.

Im Laufe des Projekts hat sich allerdings auch gezeigt, dass einige Aufgaben schwieriger waren als erwartet. Bei der Detaillierung der Prozesse fiel auf, dass das Vorhaben, komplexe Prozesse in einfache, für den Benutzer überschaubare Standardabläufe zu transferieren, eine große Herausforderung darstellt. Die Herangehensweise eines Fachmanns für Energieeffizienzanalysen ist vielfach zu kompliziert, um in einfache Abläufe und Abfragen transferiert zu werden.

Zudem mussten die Formel zur Bestimmung der Energiebedarfe häufig vereinfacht werden, da sich herausstellte, dass die notwendigen Eingangsgrößen nicht im betrieblichen Umfeld der Kunden vorhanden sind. Hier liegt nach Meinung der Projektbeteiligten auch noch weiter Forschungsbedarf, um einfache Berechnungsvorschriften für weitere Prozesse, auch für weitere Branchen, wie zum Beispiel die Stahl- und Eisenindustrie, zu ermitteln. Dabei kommt es darauf an mit möglichst wenig Eingangsgrößen eine gute (ausreichend genaue) Abschätzung des Energiebedarfs zu erhalten.

Desweiteren sind die möglichen Wechselwirkungen einzelner Maßnahmen aufeinander genauer zu untersuchen und in die Software zu integrieren. Hier besteht die Herausforderung, der Software so viel Intelligenz einzuprogrammieren, dass diese Wechselwirkungen erkannt werden und Vorschläge zur richtigen Kombination der Maßnahmen gemacht werden. Es hat sich im Laufe des Projekts gezeigt, dass die Berechnungszeit für die Bilanzierung aufgrund der mathematischen Berechnungen und der Notwendigkeit den Energiebedarf für mindestens einen Jahresverlauf zu berechnen nicht unerheblich ist. Es ist davon auszugehen, dass es nicht möglich sein wird alle technischen Varianten der Einsparung zu berechnen, ohne dass die Berechnungsdauer so weit ansteigt, dass das Programm unbenutzbar wird.

Hierfür müssen intelligente Algorithmen entwickelt oder gefunden werden, die die Anzahl der sinnvollen Varianten beschränkt. Mögliche Methoden wären hier z.B. die Constraintprogrammierung¹³, die Einschränkungen definiert, so dass die mögliche Anzahl an Varianten beschränkt wird oder moderne Optimierungsalgorithmen und Solver für multidimensionale Lösungsräume, z.B. Nelder Mead oder Particle Swarm Methoden

¹³ Wallace M. G.

9 Schlussfolgerung und Ausblick

Abschließend ist festzuhalten, dass die erste Phase gezeigt hat, dass es möglich ist die energetischen Einsparpotenziale in der kunststoffverarbeitenden Branche durch eine Software, aufzuzeigen. Die Prozesse lassen sich größtenteils mit wenigen Eingabeparametern beschreiben. Die Verknüpfung der einzelnen Teilprozesse lässt sich darüber hinaus durch die Erarbeitung eines Baukastensystems einfach realisieren. Dem Anwender wird somit der Aufwand der komplizierten Modellbildung abgenommen. Die Erarbeitung der mathematischen Beziehungen erforderte allerdings mehr Aufwand als geplant, da im betrieblichen Umfeld nur selten die Eingabegrößen zur Verfügung stehen, die zur wissenschaftlichen Berechnung des Energiebedarfs normalerweise benötigt werden. Hier ist es wichtig mit empirischen Daten oder Vereinfachungen zu rechnen. Desweiteren benötigt die Berechnung aller theoretisch möglichen Optimierungsmaßnahmen im jetzigen Prototyp noch zu viel Zeit, sodass der Einsatz der Software beim Kunden gebremst wird. Hier sind u.a. durch bessere Optimierungsmethoden noch Lösungen zu erarbeiten.

In einer zweiten Phase sollte die Methode dahingehend erweitert werden, dass zum einen die Anzahl der Optimierungsvarianten durch Entscheidungsbäume und/oder Constraints reduziert werden und zum anderen die Methode auf weitere energieintensive Branchen erweitert wird. Hierfür müssen die Berechnungsmethoden und die Analyse der Prozesse noch durchgeführt werden.

10 Literaturverzeichnis

Berliner P.: Kühltürme. 1. Auflage. Springer Verlag, 1975

Cube, H.-L.: Lehrbuch der Kältetechnik. 3. Auflage, Karlsruhe: Verlag C.F. Müller, 1981

Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA): Preisatlas. *Ableitung von Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energienutzung.* Duisburg : s.n., Juni 2002.

Johannaber F.: Kunststoff Maschinenführer 4. Ausgabe, Carl Hanser Verlag, 2004

Recknagel, H.; Sprenger,E.; Schramek, E.-R.: Taschenbuch für Heizungs- und Klimatechnik. 69. Auflage. München: Oldenbourg Verlag, 1998

Reisner, K.: Fachwissen Kältetechnik für die industrielle und gewerbliche Praxis. 3. Auflage. Heidelberg: Verlag C.F. Müller, 2002

Wallace M. G.: Constraint Logic Programming, in Computational Logic: Logic Programming and Beyond, pg 512 - 532, Springer-Verlag, 2002.