



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht/Jahresbericht 18. Dezember 2013

Energieeffizienz beim Spritzgiessen von Kunststoffen

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Industrielle Prozesse
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

SwissGel AG, Wagistrasse 4, 8952 Schlieren

Auftragnehmer:

HSR Hochschule für Technik
IET Institut für Energietechnik
IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung
CH-8640 Rapperswil
www.hsr.ch

Autoren:

Colin Cianelli, Institut für Energietechnik, Hochschule für Technik Rapperswil,
colin.cianelli@hsr.ch
Benno Bucher, Institut für Energietechnik, Hochschule für Technik Rapperswil,
benno.bucher@hsr.ch
Roland Peterer, Institut für Energietechnik, Hochschule für Technik Rapperswil,
roland.peterer@hsr.ch
Daniel Marty, Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung, Hochschule für
Technik Rapperswil, daniel.marty@hsr.ch

BFE-Bereichsleiter: Martin Pulfer

BFE-Programmleiter: Martin Pulfer (BFE),
Dr. Michael Spirig, Fomenta AG (m.spirig@fomenta.ch)

BFE-Vertrags- und Projektnummer: SI/500734-01

Inhaltsverzeichnis

Abstract	4
1 Einleitung	5
1.1 Ausgangslage.....	5
1.2 Ziel des Projekts	5
2 Energie-/ Leistungsbilanz beim Spritzgiessprozess	6
2.1 In-House-Bilanzierung Messaufbau	6
2.2 Resultate In-House Messung.....	8
2.3 Einsparmöglichkeit durch Isolation.....	9
2.4 Ergebnis Isolation	9
2.5 Einsparung durch Materialmodifikation	10
2.6 Ergebnis Materialmodifikation	12
3 Energiemessungen bei den Industriefirmen.....	13
3.1 Energie-Kennzahl Spritzgiessindustrie.....	13
3.2 Erkenntnisse der Feldmessungen.....	15
4 Abgeleitete Methoden zur Effizienzsteigerung	16
4.1 Vorgehensmethode	16
4.2 Mögliche Abwärme Nutzung	16
5 Anhang A Berechnungsgrundlagen.....	18
5.1 Thermodynamik.....	18
5.2 Statistik.....	19
5.3 Elektrotechnik	19

Abstract

In Zusammenarbeiten mit der Kunststoffverarbeitenden Industrie soll der reale Energieverbrauch beim Produktionsprozess von Spritzgiessbauteilen gemessen werden. Das Projekt analysiert bei Industriepartnern die Energieströme beim gesamten Spritzgiessprozess und gewichtet die Bedeutung der verschiedenen Einflussgrößen.

Dazu wurde ein Messprinzip zur Messung von Spritzgiessproduktionsanlagen entwickelt, welches anhand einer In-House Messung verifiziert wurde. Um die aus den Messungen und Berechnungen resultierende Leistungsbilanz übersichtlich zu visualisieren wurde der Spritzgiessprozess in einem Sankey-Diagramm dargestellt.

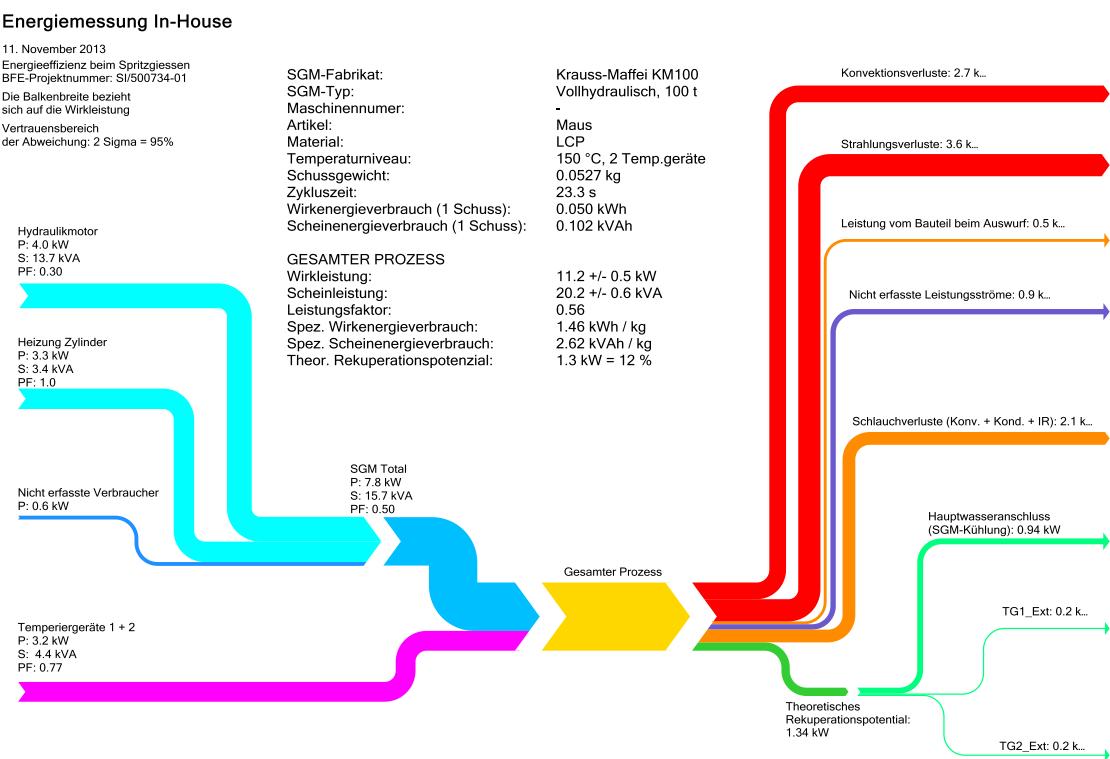


Abbildung 1: Beispiel Sankey-Diagramm

Der Gesamtenergieaufwand des Spritzgiessprozess konnte durch die Isolierung um ca. 10 % gesenkt werden. Die relative Einsparung der isolierten Spritzaggregat-Heizung, bezogen auf die nicht isolierte, beträgt 30 %. Durch die Isolation konnte somit die Temperatur im Spritzaggregat mit geringerem Energieaufwand beibehalten werden. Zudem konnte durch die Zugabe von Accelothene® ein besseres Fliessverhalten nachgewiesen werden, wobei die mechanischen Eigenschaften des Bauteils nicht beeinflusst wurden. Eine Energieeinsparung durch den Einsatz von Accelothene® ist realisierbar. Entscheidend ist, dass die Zykluszeit reduziert werden kann. Dadurch wird also bei gleicher Leistungsaufnahme der Energieverbrauch pro Schuss um fast 10 Prozent reduziert.

Die bestehende Klassifizierungs-Kennzahl wurde überarbeitet und in einer neuen Form dargestellt. Dabei wurden die Geometrie der Spritzgiessbauteile sowie die verschiedenen thermischen Eigenschaften der Kunststoffe berücksichtigt.

Die aus den Feldmessungen gewonnen Erkenntnisse wurde dazu benutzt um Methoden zur Effizienzsteigerung abzuleiten.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Verschärfte wirtschaftliche Randbedingungen und das Wissen um die Verknappung der Energiequellen führen zu einem stärkeren Bewusstsein bezüglich der Energieeffizienz bei Produktionsprozessen. Begriffe wie Energieverbrauch, Energieeffizienz und Energieverbrauchsklassifizierung machen die Runde.

Die Kunststoffverarbeitung ist ein energetisch äusserst aufwändiger Prozess, bei dem hochwertige, elektrische Energie hauptsächlich in thermische Energie umgewandelt wird. Der bedeutendste Prozess zur Herstellung von Kunststoffbauteilen ist das Spritzgiessen. Bei einer energetischen Bewertung eines einzelnen Spritzgiessproduktes sollten die Einflüsse entlang der gesamten Wertschöpfungskette berücksichtigt werden.

Für die Kunststoffverarbeiter stellen sich folgende Fragen:

- Es gibt unterschiedliche energetische Kennzahlen - was wird wie gemessen?
- Was sind die massgeblichen Einflussgrössen auf den Energieverbrauch in der Prozesskette?
- Wie kann ich den Energieverbrauch beeinflussen?
- Kann die Energiebilanz durch Kopplung von Apparaturen verschiedener Hersteller optimiert werden?
- Was sind die Konsequenzen für neue Investitionen?

Diese Fragestellung beschäftigt das Institut für Energietechnik (IET) und das Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung (IWK) der Hochschule für Technik Rapperswil (HSR). Bei den bisherigen Kennzahlen (z.B. Energieaufwand pro Masse herstelltes Spritzgussteil in kWh/kg) werden jeweils allgemeine Faktoren wie Leistungsaufnahme der Spritzgiessmaschine (SGM) berücksichtigt und bewertet, anderer Energieverbrauch wie die von Temperiergeräten hingegen weggelassen. Zusätzlich ist der Energieaufwand bei einem dünnwandigen Bauteil anders zu bewerten als bei einem technischen Spritzgusssteil. Eine Energiekennzahl sollte die Klasse der Spritzgusssteile berücksichtigen.

1.2 Ziel des Projekts

In Zusammenarbeit mit der Kunststoffverarbeitenden Industrie soll der reale Energieverbrauch beim Produktionsprozess von Spritzgiessbauteilen gemessen werden. Das Projekt analysiert bei Industriepartnern die Energieströme beim gesamten Spritzgiessprozess und gewichtet die Bedeutung der verschiedenen Einflussgrössen.

Vor allem wird das Potenzial der einzelnen Teilprozesse hinsichtlich der Rekuperation von thermischer Energie evaluiert. Besteht ein Potenzial für energieeinsparende Massnahmen, bleibt die ökonomische Frage wie sich bei einer Umsetzung die Kapitalrendite entwickelt.

Ein weiteres Ziel dieses Projektes ist die Definition einer universellen Kennzahl zur Bewertung des Energieverbrauchs zur Herstellung eines spezifischen Spritzgussteils; die Kennzahl sollte sämtliche Einflussgrössen wie Energie- und Materialverbrauch berücksichtigen. Mit der Kennzahl kann ein einzelnes Spritzgiessbauteil bewertet werden, aber auch die gesamte Produktion einer Firma.

Zusammengefasst sind die Ziele des Projekts wie folgt:

- Erfassung aller Energieströme in Produktionsanlagen beim Spritzgiessprozess, inklusive der üblichen Peripheriegeräte wie Temperiergerät, Trockner, Roboter und Förderbänder
- Ermittlung des Potenzials zur Energierekuperation bei Industriepartnern
- Ermittlung einer Kennzahl, welche den gesamten Produktionsprozess berücksichtigt
- Bau eines Prototyps zur Rekuperation der Energie (End-of-Pipe)
- Bestimmung des Verbesserungspotentials beim Einsatz von Additiven.

Es werden Pilotmessungen an den Spritzgiessmaschinen des IWK durchgeführt und die entwickelte Messmethode zur Analyse der Energieflüsse bei den Produktionsprozessen der Industriepartner angewandt.

2 Energie-/ Leistungsbilanz beim Spritzgiessprozess

Um die Anonymität der Firmen zu wahren wurde das Messverfahren mit Resultaten anhand einer In-House Messung am IWK aufgezeigt. Diese In-House Messung wurde im Rahmen des Projekts an der Hochschule für Technik HSR in Rapperswil an einer Krauss Maffei Spritzgiessmaschine durchgeführt.

Als Ausgangsprodukt wurde ein hochtemperiertes Spritzgiessteil gewählt, welches bei einer Werkzeugtemperatur von 150 °C verarbeitet wird. Aufgrund der hohen Temperatur lassen sich mit einer Vergleichsmessung einfach umzusetzende Energiesparmassnahmen aufzeigen. Die Spezifikationen von Maschine und Produkt sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Maschinenhersteller	Krauss Maffei
Typ	100-380 CX
Baujahr	2009
Bauteilbezeichnung	Maus
Material	LCP
Fachzahl	1-fach
Zykluszeit	23.3 s
Schussgewicht	52.7 g
Kategorie	Technisches Bauteil

Tabelle 1: Spezifikationen In-House Messung

2.1 In-House-Bilanzierung Messaufbau

Für die stationäre Leistungsbilanz muss gelten, dass die eingehende Durchschnittsleistung (Input) und die ausgehende Durchschnittsleistung (Output) gleich gross sind.

$$\sum \bar{P}_l = 0$$

Die durchschnittliche Leistung wird anhand der zeitlich integrierten Momentanleistung, geteilt durch die Gesamtzeit ermittelt:

$$\bar{P}_l = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \cdot \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt$$

In Abbildung 2 wird das Messprinzip der In-House Messung aufgezeigt. Die Messung kann in folgende Bereiche unterteilt werden:

- Elektrische Leistungsmessung (gelb)
- Kühl- und Temperierkreisläufe (blau und rot) (Durchfluss- und Temperaturmessung)
- Oberflächenmessung Werkzeug (rot) (Temperaturmessung)

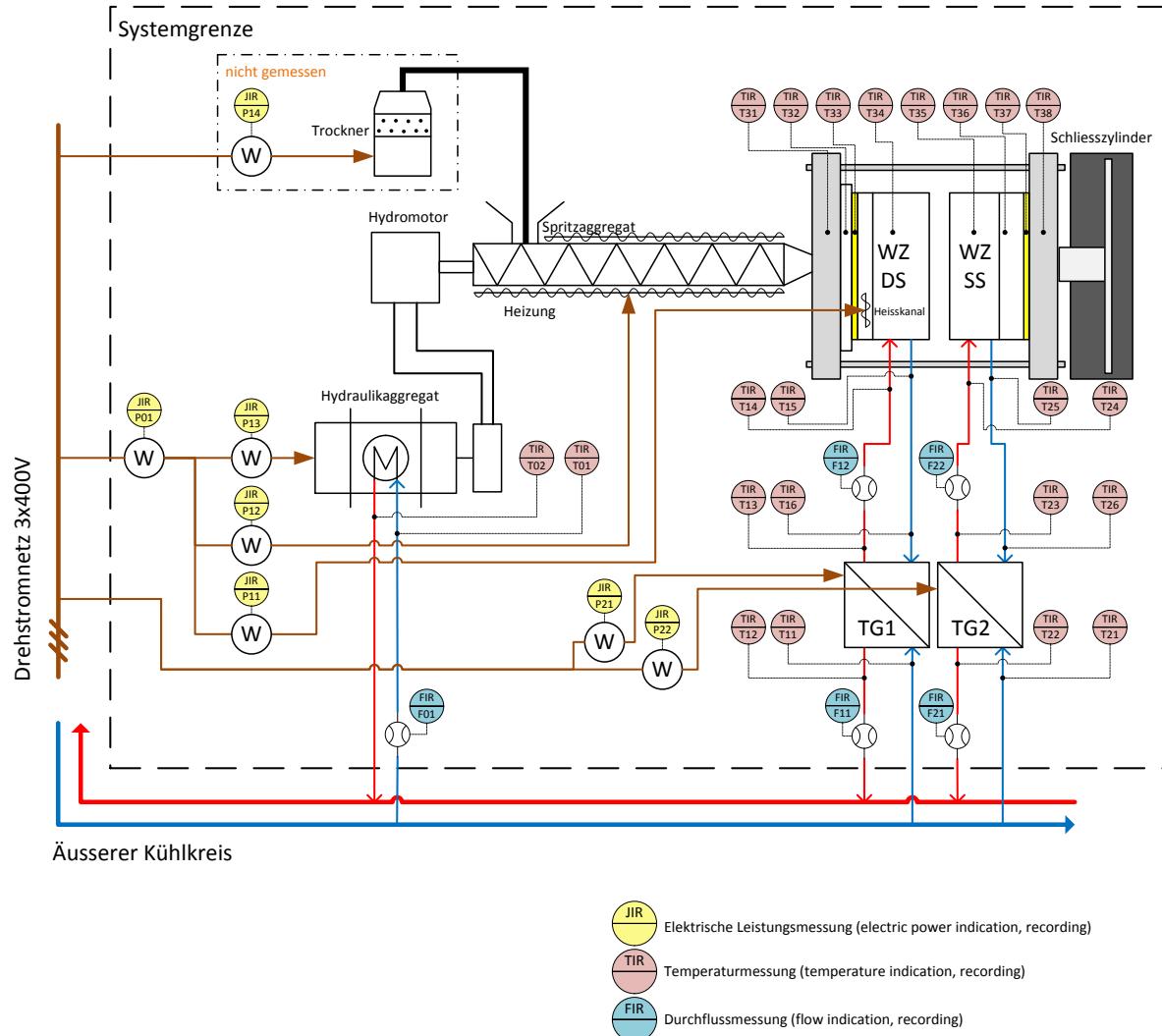


Abbildung 2: Messprinzip der In-House Messung

Im betrachteten Prozess wird erwartet, dass der gesamte Input elektrisch eingebracht wird. Dies beinhaltet die elektrische Leistung für das Hydraulikaggregat, die Heizung des Spritzaggregats, die Heizung des Heisskanals, sowie für die beiden Temperiergeräte (TG1, TG2). Die Temperiergeräte sind auf eine Prozesstemperatur von 150 °C eingestellt. Da der Trockner im betrachteten Prozess nicht ins Gewicht fällt, wurde er aus Zeitgründen nicht erfasst.

Sämtliche bezogene elektrische Energie wird in Wärme umgewandelt, wie Konvektionsverluste, Strahlungsverluste, sowie eine Temperaturerhöhung von Maschine und Peripherie, welche durch den äusseren Kühlkreislauf wieder abgeführt wird.

2.2 Resultate In-House Messung

Um die aus den Messungen und Berechnungen resultierende Leistungsbilanz übersichtlich zu visualisieren wurde ein Sankey-Diagramm erstellt (siehe Abbildung 3). Die Pfeildicken sind dabei proportional zur angegebenen Durchschnittsleistung P (Wirkleistung). Damit wird klar ersichtlich, wie die Energieströme fliessen und wo dementsprechend auch nach Einsparpotential gesucht werden kann.

Die verwendeten Berechnungsformeln, welche die physikalischen Grundlagen der Berechnung liefern, sind im Anhang aufgelistet.

Energiemessung In-House

11. November 2013
Energieeffizienz beim Spritzgießen
BFE-Projektnummer: SI/500734-01

Die Balkenbreite bezieht
sich auf die Wirkleistung
Vertrauensbereich
der Abweichung: 2 Sigma = 95%

Hydraulikmotor
 $P: 4.0 \text{ kW}$
 $S: 13.7 \text{ kVA}$
 $PF: 0.30$

Heizung Zylinder
 $P: 3.3 \text{ kW}$
 $S: 3.4 \text{ kVA}$
 $PF: 1.0$

Nicht erfassbare Verbraucher
 $P: 0.6 \text{ kW}$

Temperiergeräte 1 + 2
 $P: 3.2 \text{ kW}$
 $S: 4.4 \text{ kVA}$
 $PF: 0.77$

SGM-Fabrikat:
SGM-Typ:
Maschinennummer:
Artikel:
Material:
Temperaturniveau:
Schussgewicht:
Zylkusezeit:
Wirkenergieverbrauch (1 Schuss):
Scheinenergieverbrauch (1 Schuss):

GESAMTER PROZESS
Wirkleistung:
Scheinleistung:
Leistungsfaktor:
Spez. Wirkenergieverbrauch:
Spez. Scheinenergieverbrauch:
Theor. Rekuperationspotenzial:

Krauss-Maffei KM100
Vollhydraulisch, 100 t
-
Maus
LCP
150 °C, 2 Temp.geräte
0.0527 kg
23.3 s
0.050 kWh
0.102 kVAh

11.2 +/- 0.5 kW
20.2 +/- 0.6 kVA
0.56
1.46 kWh / kg
2.62 kWh / kg
1.3 kW = 12 %

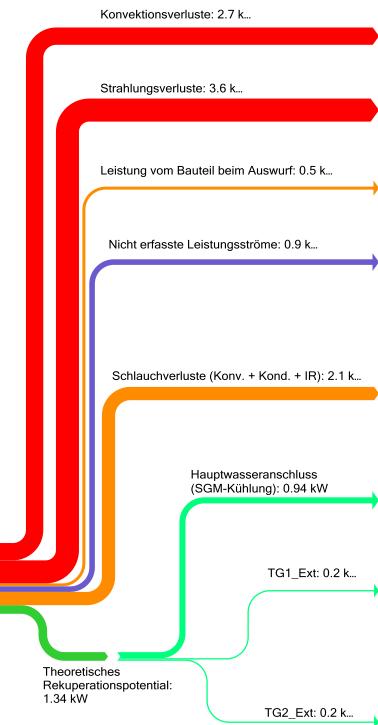


Abbildung 3: Sankey Diagramm der In-House Messung (ohne Isolation)

Im Sankey-Diagramm (Abbildung 3) ist zu erkennen, dass die grössten Leistungen für den Hydraulikmotor sowie für die Spritzagggregat-Heizung aufgewendet werden. Weiter wird ein beachtlicher Teil (3.2 kW) für die beiden Temperiergeräte eingesetzt.

Die Energieströme welche aus dem Prozess in den Kühlkreislauf abgeführt werden, sind als theoretisches Rekuperationspotential bezeichnet, da diese Energie dort technisch einfach rekuperiert werden kann. Jedoch beträgt im betrachteten Prozess die abgeführte Energie ans Kühlwasser nur knapp 10 % der Gesamtleistung und dies auf Umgebungstemperaturniveau. Das tiefe Temperaturniveau macht die direkte Rückführung in den Prozess schwierig. Eine Rückführung mittels Wärmepumpe in den Trockner (max. 90°C) ist technisch realisierbar, jedoch wirtschaftlich fragwürdig.

Grundsätzlich ist es sinnvoller, bereits beim Input Energie einzusparen als eine anfallende Abwärme zu nutzen. Aus diesem Grund soll versucht werden, den Energieaufwand apriori zu senken. Ein Ansatz ist die Einsparmöglichkeit durch Isolation wie sie in Kapitel 2.3 beschrieben wird.

2.3 Einsparmöglichkeit durch Isolation

Eine Isolation hat zum Zweck, die Wärmeleitung zu verkleinern und dadurch die Oberflächentemperatur zu senken. Als Folge werden die Konvektion sowie die Wärmestrahlung abnehmen, sofern der Emissionskoeffizient kleiner/gleich demjenigen ohne Isolation entspricht. Aus diesem Grund sind die Verluste z.B. bei der Spritzaggregat-Heizung kleiner, was bei einer geregelten Spritzaggregattemperatur eine geringere Energieaufnahme zur Folge hat.

Aufgrund der physikalischen Grundlagen sind thermischen Verluste proportional zur Grösse des Temperaturgradienten und der Oberfläche. Anlagenteile mit hohen Temperaturen können am nutzbringendsten modifiziert werden. Wie in Abbildung 4 und Abbildung 5 zu sehen ist, sind dies die Schläuche der Temperiergeräte (ca. 150°C Innentemperatur) und das Spritzaggregat selbst (ca. 350°C Innentemperatur).

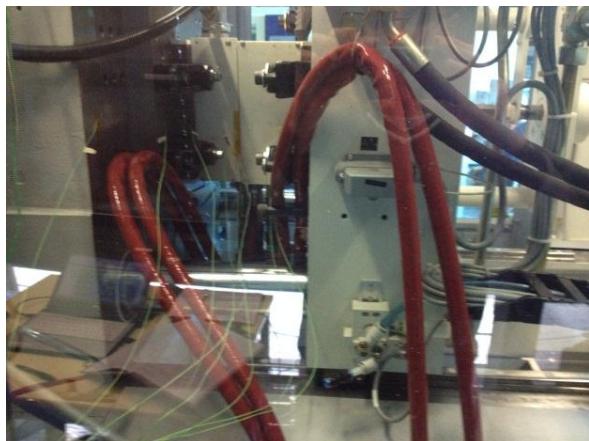


Abbildung 4: Schlauchisolation

Verwendete Schlauchisolation

- ISO-20 ziegelrot (CB-Technik, Jona SG)
- Kosten ca. 250 CHF



Abbildung 5: Spritzaggregat Isolation

Verwendete Isolation Spritzaggregat:

- Steinwolle,
Flumroc Brandschutzmatte, 40mm
FMI500 Reinalu verstärkt
- Kosten ca. 15 CHF

2.4 Ergebnis Isolation

Der Gesamtenergieaufwand des Spritzgiessprozess konnte durch die Isolierung um ca. 10 % gesenkt werden (1kW) (siehe Sankey-Diagramm in **Error! Reference source not found.**). Die relative Einsparung der isolierten Spritzaggregat-Heizung, bezogen auf jene mit Abdckung, beträgt 30 %. Der Energieaufwand für die Temperaturhaltung in der Spritzaggregat-Heizung konnte aufgrund der Isolation gesenkt werden.

Mit den isolierten Temperierschläuchen konnte keine Einsparung nachgewiesen werden. Die verwendete Schlauchisolation erfüllt andere Kriterien wie z.B. Verbrennungsschutz und ist nicht zur Energieeinsparung geeignet. Die Isolationsdicke beträgt lediglich 2-3 mm. Da jedoch die Verluste der Temperierschläuche (Weg vom Temperiergerät zu Werkzeug) beachtlich sind (2/3 der aufgewendeten Energie), sollten weitere Untersuchungen zur Isolation der Temperierschläuche durchgeführt werden. Mit einer anderen bzw. dickeren Isolation sollten Einsparungen möglich sein.

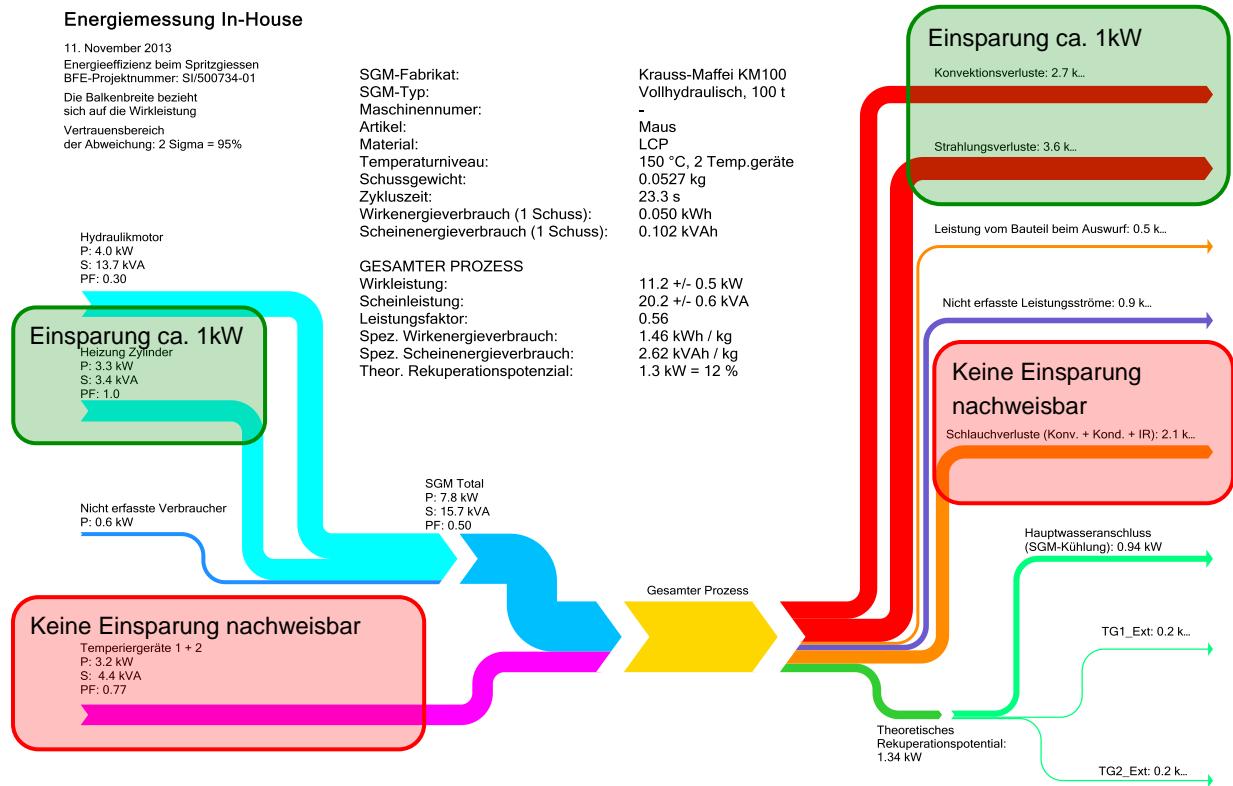


Abbildung 6: Sankey-Diagramm der In-House Messung (mit Isolation)

2.5 Einsparung durch Materialmodifikation

Bei der Materialmodifikation soll durch Zugabe eines Fliessverbesserers die Viskosität der Schmelze verringert werden. Somit wird eine geringere Einspritzleistung für die Füllphase benötigt. Dies ist aber nicht der Hauptansatz für die energieeinsparende Massnahme, sondern, dass aufgrund des Fliessverbesserers die Temperatur des Spritzgiesszylinders gesenkt werden kann, bis wieder die gleiche Eigenschaft der Schmelze (in diesem Fall die Viskosität) vorliegt. Dies wiederum bedeutet, dass auch weniger gekühlt werden muss, wodurch die gleiche Entformtemperatur zu einem kürzeren Zeitpunkt erreicht wird (Zykluszeitreduktion).

In diesem Projekt wurde das Accelothene von der Firma SwissGEL für die Untersuchungen verwendet. Dieses eignet sich insbesondere für Polyolefine Kunststoffe. Wenn ein Zusatz zur Anwendung kommt, ist es auch wichtig zu untersuchen, ob sich allenfalls auch die mechanischen Eigenschaften des Kunststoffes bzw. des Bauteil ändern. Aus diesem Grund wurden auch mechanische Prüfungen an unterschiedlichen Prüfkörpern durchgeführt. Weiter wurde untersucht, wie stark sich die Viskosität nach Zugabe von Accelothene ändert.

Die folgende Abbildung 7 zeigt den Schmelzindex-Vergleich eines PE-HDs ohne und mit 5% Accelothene. Dabei wird das Kunststoffgranulat aufgeheizt und mit einem bestimmten Gewicht durch eine genormte Düse gepresst. Anschliessend kann das Gewicht gemessen (MFR – Melt Flow Rate) und das Volumen (MVI – Melt Volume Index) bestimmt werden.

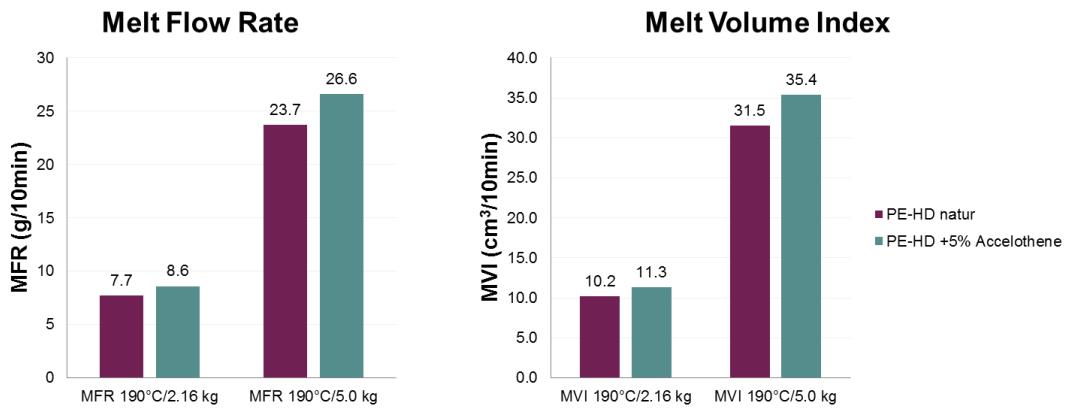


Abbildung 7: Schmelzindex - Vergleich mit und ohne Accelothene

Dabei wurde bei den tiefen Scherraten eine Viskositätsverbesserung von ca. 10% festgestellt.

Um abschätzen zu können, wie stark die Temperatur im Spritzgiesszylinder gesenkt werden kann, ist eine Viskositätsmessung bei höheren Scherraten erforderlich. Dazu wurden die Fliesskurven wiederrum ohne und mit 5% Accelothene in einem Kapillarrheometer bestimmt wie in Abbildung 8 ersichtlich ist.

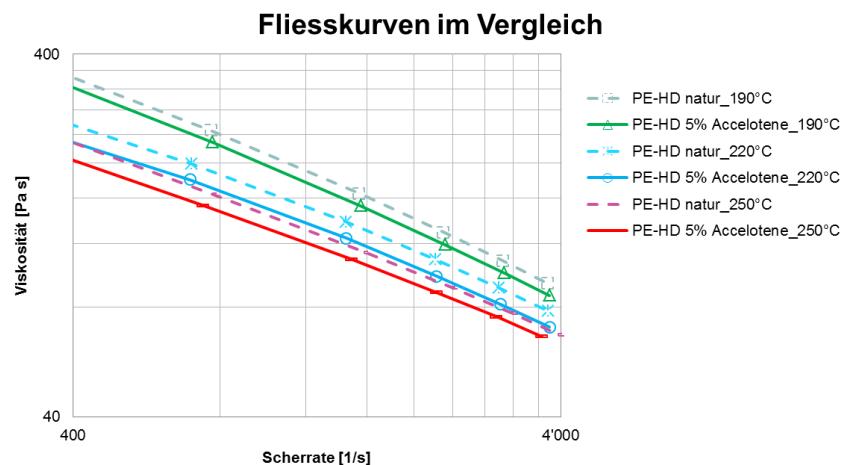


Abbildung 8: Fliesskurven mit und ohne Accelothene

Aus der Untersuchung wird ersichtlich, dass bei dem PE-HD mit Accelothene bei 220°C etwa die gleiche Viskosität vorliegt, wie beim PE-HD ohne Fliessverbesserer bei 250°C. Somit ist mit einer Temperatursenkung von rund 30°C zu rechnen.

Die mechanischen Eigenschaften wurden an unterschiedlich dicken Zugprüfkörpern mit und ohne Bindenahrt getestet. Es wurde dabei festgestellt, dass kein wesentlicher Einfluss des Accelothenes auf die mechanischen Eigenschaften zu sehen ist. Einerseits ist dies positiv für eine Materialsubstitution, da keine starken Änderungen zu erwarten sind, andererseits ist es auch nicht möglich, auf Grund der verbesserten Fließeigenschaften eine erhöhte Bindenahrtfestigkeit zu erreichen.

Bei In-Hous Messungen an drei Bauteilen mit unterschiedlicher Wanddicke wurde die Einsparung im Spritzgiessprozess ermittelt. Diese Ergebnisse wurden bereits im Vorjahresbericht vorgestellt und betragen bei allen drei Bauteilen knapp 10 %.

2.6 Ergebnis Materialmodifikation

Es wurde nachgewiesen, dass die Zugabe von Accelothene eine Fließverbesserung bewirkt und auch, dass die mechanischen Eigenschaften des Bauteils nicht beeinflusst werden.

Eine Energieeinsparung durch den Einsatz von Accelothene ist realisierbar. Der Einfluss der Wanddicken ist im Rahmen dieser Untersuchung vernachlässigbar und zeigt keinen Nennenswerten Einfluss auf den Energiebedarf.

Entscheidend ist aber eine reduzierte Zykluszeit. Dadurch wird bei gleicher Leistungsaufnahme der Energieverbrauch um fast 10 Prozent reduziert.

3 Energiemessungen bei den Industriefirmen

Um eine Übersicht der Energieeffizienz beim Spritzgiessprozess in der kunststoffverarbeitenden Industrie von Schweizer Firmen zu erhalten, wurden Firmen angefragt, um an deren Herstellungsprozessen die Energiebilanz zu bestimmen.

An den Messungen haben sechs Schweizer Grossunternehmen teilgenommen. Dabei wurde von 13 verschiedenen Spritzgiessprodukten der spezifische Energieverbrauch gemessen. Um die Anonymität der Firmen zu gewährleisten, sind die Daten ohne Firmenzuweisung dargestellt.

3.1 Energie-Kennzahl Spritzgiessindustrie

Abbildung 9 zeigt eine universelle Energie-Kennzahl in vier Grafiken. Die gemessenen Produkte sind dabei mit Buchstaben gekennzeichnet. In der Ordinate ist der Wirkungsgrad logarithmisch dargestellt. Unter Wirkungsgrad wird die spezifische Enthalpie der jeweiligen Kunststoffsorte, geteilt durch den tatsächlichen Energieaufwand pro Teilemasse ohne Anguss in kWh/kg, verstanden. Er soll eine Aussagekraft haben, wie Effizient das Bauteil hergestellt wurde, die jeweilige Geometrie und Beschaffenheit (z.B. Sichtteil) wird beim Wirkungsgrad nicht berücksichtigt.

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{spez. Enthalpie}}{\text{Energieaufwand}} = \frac{h(T_{schmelz})}{w}$$

In der Abszisse der ersten Grafik ist der „Form Faktor“ aufgetragen. Unter dem „Form Faktor“ wird die Abweichung der Bauteilform zu einer Kugel verglichen. Dementsprechend wird die Oberfläche des Bauteils durch die Oberfläche einer Kugel mit gleichem Volumen wie das Bauteil dividiert. Der Fachausdruck wird als Sphärizität bezeichnet. Je höher der Wert, desto mehr Übertragungsfläche steht für den Wärmeabtransport zur Verfügung, was unter anderem massgebend für die Abkühlzeit bzw. Zykluszeit ist.

$$FF = \frac{A_{Teiloberfläche}}{A_{Kugeloberfläche}}$$

In der Abszisse der zweiten Grafik ist eine „charakteristische Dicke“ aufgetragen. Die „charakteristische Dicke“ ist das Volumen des Bauteils dividiert durch seine Oberfläche und ist eine Aussage über das Größenverhältnis von Volumen zu Oberfläche des Bauteils. Je grösser das Teil, und je ähnlicher einer Kugel, desto grösser wird die charakteristische Dicke, da das Volumen mit der 3ten Potenz vom Radius wächst, die Oberfläche jedoch lediglich mit der 2ten Potenz.

$$\text{charakteristische Dicke} = \frac{V_{Teil}}{A_{Teiloberfläche}}$$

In der Abszisse der dritten Grafik ist die massgebende Wandstärke aufgetragen. Dies ist ein in der Spritzgussindustrie häufig verwendeter Parameter um Bauteile zu spezifizieren.

In der Abszisse der vierten Grafik sind die Bauteile nach der bestehenden Einteilung (dünnwandig, technisch, dickwandig) aufgetragen.

Aufgrund der geringen Datenmenge kann keine pauschale Aussage zur Effizienz gemacht werden deshalb ist eine Klassifizierung noch nicht möglich.

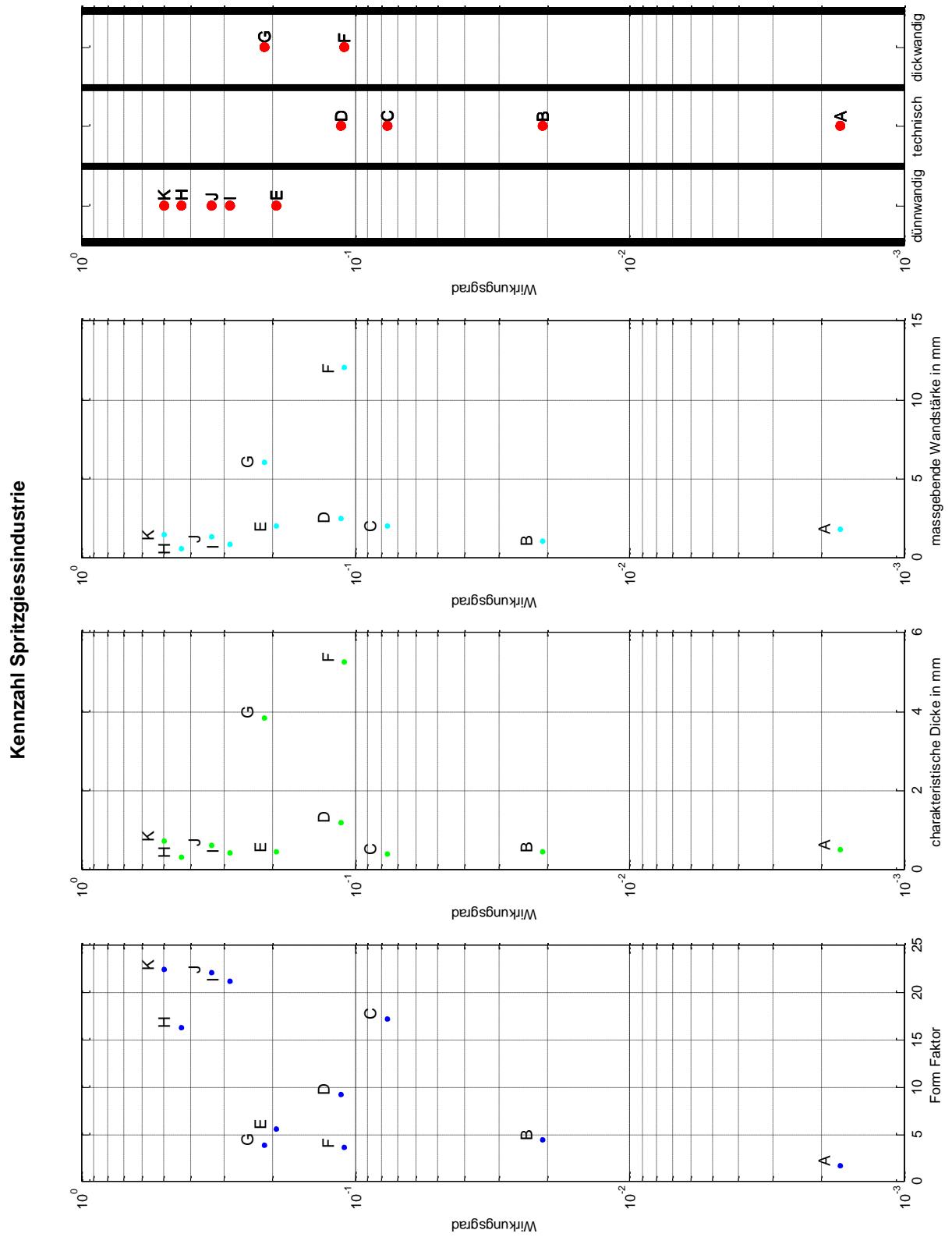


Abbildung 9: Kennzahl Spritzgiessindustrie

3.2 Erkenntnisse der Feldmessungen

Die Messungen bei den teilnehmenden Firmen haben folgende Erkenntnisse in Erfahrung gebracht.

1. SGM Allgemein

- a. Maschinen mit Konstantpumpen und langen Stillstandzeiten (Restkühlzeit) führen zu schlechten Wirkungsgraden.
Im Stillstandbetrieb generieren Konstantpumpen unnötige Reibungswärme im Öl, welches lediglich im System zirkuliert, jedoch nicht für die Produktion genutzt wird.
- b. Vollhydraulische Maschinen mit adaptiver Pumpendrehzahl (z.B. Ecodrive) können eine ähnliche Effizienz wie vollelektrische Maschinen erreichen.

2. Spritzaggregat

- a. Sind in der Regel mit einer einfachen Abdeckung versehen.
- b. Vorhandene Isolationen schöpfen nicht das volle Potenzial aus. Die Oberflächentemperaturen bewegen sich immer noch im Bereich von 70°C
- c. Isolationen aus Steinwolle (In-House-Versuch, siehe Seite 9, Kapitel 2.4) erreichen eine bessere Isolation bei gleichzeitig tieferen Akquisitionskosten.
- d. Isolation ist aber nicht immer möglich, da insbesondere bei tiefen Temperaturen die Regelung nicht mehr gewährleistet werden kann.

3. Werkzeug

- a. Bei hochtemperierten Werkzeugen führen nicht isolierte Teile der SGM Einrichtung (insbesondere Schläuche) zu einer beträchtlichen unnötigen Verlustleistung.
- b. Ebenfalls wird viel Wärme über die Aufspannplatten abgeführt sofern keine Isolierplatten montiert sind.

4. Temperiergerät

- a. Die Platzierung der Temperiergeräte ist in der Regel nicht optimal. Daraus ergeben sich unnötig lange Schläuche. In Kombination mit hochtemperierten Werkzeugen führt dies zu erheblichen Verlustleistungen entlang der Schläuche vom Temperiergerät zum Werkzeug.
- b. Die Temperaturniveaus der Wärmeflüsse sind ungünstig für eine Rekuperation (Anergieanteil zu Umgebungstemperatur >80%).

5. Peripherie

- a. Das Aushärten von Kunststoffen, wie beispielsweise PU (Polyurethan) erfolgt mittels IR-Quellen, sogenannte Heizstrahler.
Die Strahlen sind weder gerichtet, noch sind die Bänder, auf denen die Teile den aushärten Prozess durchlaufen gegenüber der Umgebung isoliert.
- b. Peripherie die reine Bewegungsabläufe durchlaufen (z.B. Greifroboter) sind ohnehin bereits sehr energieeffizient. Die Wärmeproduktion ist unwesentlich. Die kinetische Energie wird i.d.R. dem System zurückgeführt.

4 Abgeleitete Methoden zur Effizienzsteigerung

Um die Energieeffizienz beim Spritzgiessen zu erhöhen werden einige Ideen aufgelistet, die je nach Anwendungsfall zum Einsatz kommen könnten.

- Tiefe Oberflächentemperaturen (Isolation Spritzaggregat)
- Bei langen Stillstandszeiten sollten geregelte Hydraulikpumpen verwendet werden (Servohydraulisch)
- Zykluszeit so kurz wie möglich
- Temperiergeräte so nahe wie möglich an Maschine (Schläuche kurz halten)
- Temperierschläuche isolieren (bei hochtemperierten, sowie auch bei aktiv gekühlten Werkzeugen wegen der Kondensation der feuchten Raumluft)
- Kondensation von Luftfeuchtigkeit bei aktiv gekühlten Leitungen verhindern (latente Wärme, Kondensationsenthalpie)
- Nachgelagerte Prozesse müssen separat betrachtet werden

4.1 Vorgehensmethode

Nachfolgend wird eine Vorgehensmethode aufgezeigt, wie man zielführend Energiesparmaßnahmen durchführen kann.

- Energiemessung Spritzgiessprozess durchführen
- Sankey Diagramm erstellen
- Dicke Energie-/Leistungszweige betrachten
- Energiesparmethode entwickeln
- Energiesparmethode umsetzen
- Nachmessung zur Überprüfung und Auswertung

4.2 Mögliche Abwärme Nutzung

Aufgrund des tiefen Temperaturniveaus der theoretisch rekuperierbaren Energie wird in Abbildung 10 eine Prozessübergreifende Möglichkeit aufgezeigt, wie die Abwärme in anderer Weise genutzt werden kann.

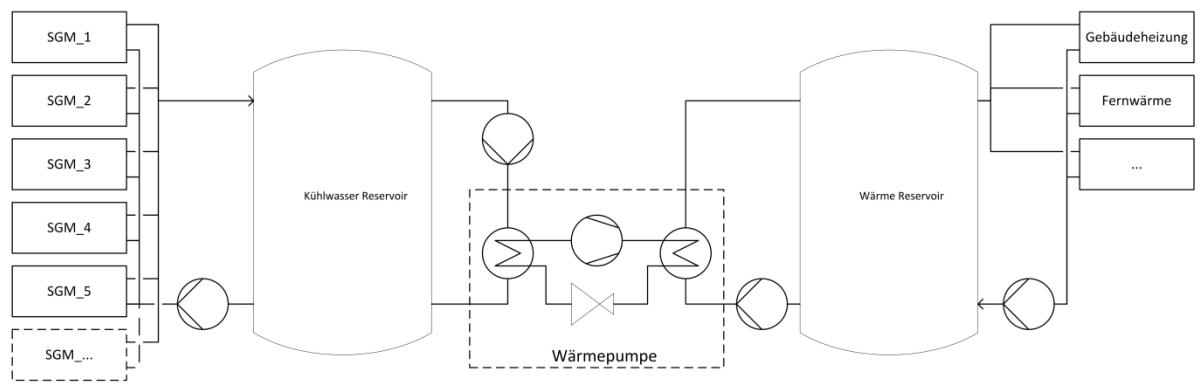


Abbildung 10: Abwärme Nutzung durch Wärmepumpe und Wärmespeicher

5 Anhang A Berechnungsgrundlagen

Zusätzliche Erklärungen zur Anwendung der Berechnungsgrundlagen sind im Schlussbericht zu finden.

5.1 Thermodynamik

Konvektion	$\dot{Q}(T_\omega, T_\alpha) = A \cdot \alpha \cdot (T_\omega - T_\alpha)$	\dot{Q}	Wärmestrom	W
		A	Übertragungsfläche	m^2
		α	Wärmeübergangskoeffizient	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
		$T_\omega - T_\alpha$	Temperaturdifferenz	K
Strahlung	$\dot{Q}(T_\omega, T_\alpha) = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{Umg} - T_{Oberfl.})^4$	\dot{Q}	Wärmestrom	W
		A	Übertragungsfläche	m^2
		ε	Emissionskoeffizient	-
		σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	$\frac{W}{m^4 \cdot K}$
Konduktion	$\dot{Q}(T_\omega, T_\alpha) = A \cdot k \cdot (T_\omega - T_\alpha)$	A	Übertragungsfläche	m^2
		k	Wärmedurchgangskoeffizient	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
		$T_\omega - T_\alpha$	Temperaturdifferenz	K
	$k = \frac{\lambda}{s}$	λ	Wärmeleitfähigkeit (der Wärmedämmplatte)	$\frac{W}{m \cdot K}$
Akkumulation	$\dot{Q}(T_{Start}) = \frac{c_{p,Stahl} \cdot \overbrace{(T_{Start} - T_{End})}^{\approx K} \cdot m}{t}$	$c_{p,Stahl}$	Wärmekapazität Stahl	$\frac{W}{kg \cdot K}$
		m	Wärmeakkumulierende Masse	kg
		t	Zeit bis 3τ erreicht wurde	s
		T	Temperatur	K
	$T_{End} = T_{Start} + K \cdot \left(1 - e^{-\frac{x}{\tau}}\right)$	τ	Zeitkonstante PT-1-Glied	s
		A	Starttemperatur	K
		K	Verstärkungsfaktor (ΔT)	K
		x	Laufvariable (Zeitpunkt)	s
Hydraulik	$\dot{Q}(T_\omega, T_\alpha, \dot{m}) = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_\omega - T_\alpha)$ $Q_i(T_\omega, T_\alpha, \dot{m}) = \dot{m}_i \cdot c_p \cdot (T_{\omega_i} - T_{\alpha_i}) \cdot \Delta t$	\dot{Q}	Wärmestrom	W
		\dot{m}	Massenstrom	$\frac{kg}{s}$
		$c_p(p, T)$	Wärmekapazität Wasser	$\frac{J}{kg \cdot K}$
		$T_\omega - T_\alpha$	Temperaturdifferenz	K
		Δt	Zeitintervall (= Abtastintervall der Sensoren = 1 s)	s
	$\dot{Q}_{average} = \frac{1}{t} \int_{t_\alpha}^{t_\omega} \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_\omega - T_\alpha) dt$ $\approx \frac{1}{t} \sum_i^N Q_i$			

5.2 Statistik

Fehlerfortpflanzung	$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot \Delta x_i^2}$	Δy	Vertrauensbereich der Funktion (abhängig Veränderliche)
		Δx_i	Vertrauensbereich der einzelnen Variablen (unabhängig Veränderliche)

5.3 Elektrotechnik

Scheinleistung S	$S_{\text{Messung}} = \frac{1}{t} \cdot \underbrace{\int S dt}_{\text{Messzeit Kumulierte Scheinenergie}}$	Messzeit & kumulierte Schein- und Wirkenergie werden von den Messgeräten ausgegeben.
Wirkleistung P	$P_{\text{Messung}} = \frac{1}{t} \cdot \underbrace{\int P dt}_{\text{Messzeit Kumulierte Wirkenergie}}$	
Blindleistung	$Q_{\text{Berechnet}} = \sqrt{S^2 - P^2}$	