



Schlussbericht vom 3. Juli 2019

EE-Proc-Steel

Bezugsrahmen für die Energieeffizienz von Prozessketten in der Stahlverarbeitung



©GVS



inspire

AG für mechatronische Produktions-
systeme und Fertigungstechnik



Datum: 3. Juli 2019

Ort: Bern

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

www.bfe.admin.ch

energieforschung@bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:

inspire AG

Technoparkstrasse 1

CH-8005 Zürich

www.inspire.ethz.ch

Züst Engineering AG

Eichbühlstrasse 6

CH-8607 Seegräben

www.zuestengineering.ch

Autor/in:

Lukas Weiss, Dipl. Ing. ETH, weiss@inspire.ethz.ch

Dr. Rainer Züst, Dipl. Ing. ETH, rainer.zuest@zuestengineering.ch

BFE-Bereichsleitung: Dr. Carina Alles, Carina.Alles@bfe.admin.ch

BFE-Programmleitung: Dr. Carina Alles, Carina.Alles@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501820-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Die Stahlverarbeitung in der Schweiz ist teilweise ein Kreislaufprozess, der mit elektrischem Strom und Gas aufrechterhalten wird. Zwei Stahlwerke (Swiss Steel in Emmenbrücke und Stahl Gerlafingen) produzieren jährlich rund 1.3 Mio. t Stahlhalbzeug aus Schrott, was der Alteisenmenge der Schweiz entspricht. Die Stahlverarbeitung geschieht über mehrere Stufen in Prozessketten mit zum Teil hoher Wertschöpfung.

Der bisherige Fokus energetischer Optimierungen lag auf dem Energiebedarf einzelner Produktionsschritte entlang der Wertschöpfungskette, also auf der Effizienz. Ausgeklammert blieben der Energiebedarf für die Bereitstellung der Rohteile resp. Halbzeuge, die Aufarbeitung des Produktionsschrotts und die Frage, ob durch Änderungen der Prozesskette Prozessschritte substituiert oder obsolet werden können.

Die Studie erstellt eine erste Grundlage für die übergreifende Beurteilung des Energieverbrauchs ausgewählter Prozessketten. Auslöser für diese Auslegeordnung ist die zunehmende Bedeutung von *Additiver Fertigung* (Additive Manufacturing, AM) in der Stahlbearbeitung. Es soll exemplarisch aufgezeigt werden, wie sich Prozessketten qualitativ und quantitativ verändern, auch unter dem Einfluss von AM.

Die vorliegende explorative Studie geht auf sechs ausgewählte Prozessketten im Bereich der stahlverarbeitenden Industrie in der Schweiz ein. Sie identifiziert die energetisch relevanten Aspekte und zeigt die Auswirkungen auf den Energieverbrauch durch Veränderungen in der Prozesskette auf, unter anderem durch Einsatz von AM:

- AM im Pulverbett
- Eisenguss mit AM-Formen
- Hybridfertigung mit Zerspanung
- Blankziehen und Verarbeitung durch die Décolletage
- Blechverarbeitung
- Stahlbau

Die ersten drei Prozessketten haben einen direkten Bezug zu AM. Sie wurden vollständig analysiert und quantitativ ausgewertet. Die weiteren drei Prozessketten repräsentieren Prozessketten mit hoher Materialintensität, also hohem Materialdurchsatz, oder sie haben das Potential, etablierte Prozessschritte, wie z. B. Härten, zu eliminieren. Sie wurden qualitativ und eingeschränkt durch die verfügbaren Informationen nur teilweise quantitativ ausgewertet.

Für jede Prozesskette wurde eine energetische Auswertung in Form von eines Prozessdiagramm gemacht. Für jeden einzelnen Prozessschritt wurde der Energiebedarf bestimmt und dem Werkstück als *graue Energie* zugeordnet. Der Materialverlust, bedingt durch Fertigungsprozess, Abschnitte, Ausschuss, Lagerverluste, etc. wurde ebenfalls graphisch dargestellt.

Die Betrachtung der einzelnen Prozessketten zeigt, dass auf den verschiedenen Wertschöpfungsstufen teilweise hohe Recyclinganteile anfallen, beispielsweise beim Drehen ab Stange (Décolletage), Stahlbau (mit Stahlträgern) oder Blechverarbeitung (Laserschneiden, Stanzen). Der Recyclinganteil ist der wesentliche Treiber der grauen Energie der gefertigten Teile. Er führt zu einem eng verflochtenen Netz der Wieder- und Weiterverwertung, innerhalb eines Unternehmens wie auch unternehmensübergreifend. Der Energiebedarf in der Stahlverarbeitung kann durch endformnahe Rohteile gesenkt werden. Ist Schrott prozessbedingt unvermeidlich, so soll das Recycling sortenrein erfolgen.



Der Einfluss von AM im Pulverbett auf den Energieverbrauch in der Stahlverarbeitung ist heute und für die absehbare Zukunft aufgrund des geringen Mengenanteils irrelevant. Hingegen haben additive Verfahren zum Beispiel als *Enabling Technology* im Eisenguss bereits Fuss gefasst. Aus energetischer Sicht hochinteressant ist die Wieder- und Weiterverwendung von Werkstücken. Hier kann AM eine hohe Hebelwirkung auf die Wertschöpfung entfalten, wie am Beispiel einer hybriden Fertigung bei der Aufarbeitung von verschlissenen Turbinenschaufeln oder Düsen gezeigt wird.

Zusammenfassend wird festgestellt:

- Das Konzept der grauen Energie ist tragfähig. Es zeigt die Relevanz der einzelnen Prozessschritte in Bezug auf den Energieverbrauch auf.
- Die graue Energie des Werkstücks wird vor allem durch die Effizienz der Materialverwendung bestimmt. Selbst die energieintensivsten Fertigungsprozesse tragen weniger zur grauen Energie bei als die anfallenden Materialverluste. Umweltbilanzen dürfen sich nicht auf Materialmenge des Fertigteils abstützen, sondern müssen den gesamten Materialverlust und dessen Rückführung in den Kreislauf berücksichtigen.
- AM im Pulverbett erfüllt die Ansprüche einer materialeffizienten Fertigung weniger als ausgewählte hybride Prozessketten, welche AM und Zerspanung geschickt kombinieren. Besonders glücklich ist die direkte Wiederwendung von verschlissenen Teilen als Rohling. Im gesamten Spektrum der Stahlverarbeitung sind dies zwar Sonderfälle. Die Vorteile sind jedoch so bestechend, dass sich eine gezielte Forschung in diese Richtung lohnt.
- Bei materialintensiven Prozessketten können bereits kleine Veränderungen durch die grossen Skaleneffekte grosse Wirkungen verursachen. In der Blechverarbeitung ist es insbesondere das wertigkeitsgerechte Recycling der Abschnitte durch *Lean Production* und *Industrie 4.0*. Im Stahlbau ist es die gezielte Wiederverwendung von Halbzeugen und von ganzen Baugruppen. Die Effektivität solcher Massnahmen legt weitere Forschung in diesem Bereich nahe.

Die Studie wurde von einer Begleitgruppe unterstützt, dessen Mitglieder Experten in einer der untersuchten Prozessketten sind. So konnte der Zugang zu relevanten Informationen erschlossen werden.

Résumé

Le traitement de l'acier en Suisse est en partie un processus cyclique maintenu avec une combinaison d'électricité et de gaz. Deux aciéries (Swiss Steel à Emmenbrücke et Stahl Gerlafingen) produisent chaque année environ 1,3 million de tonnes de produits semi-finis à partir de ferraille, ce qui correspond à la quantité de ferraille produite en Suisse. La transformation de l'acier s'effectue en plusieurs étapes dans des chaînes de procédés, certaines à forte valeur ajoutée.

Auparavant, l'optimisation énergétique se concentrait sur l'énergie des différentes étapes de la chaîne de valeur d'un produit, c'est-à-dire sur l'efficacité énergétique. Les besoins énergétiques pour la pièce brute ou le produits semi-finis, le traitement des rebuts et la question de savoir si les étapes du processus peuvent être remplacées ou rendues obsolètes par des changements dans la chaîne ont été exclus.

L'étude fournit une première base pour une évaluation globale de la consommation d'énergie de la chaîne de procédés sélectionnée. Le déclencheur de l'étude est l'importance croissante de la fabrication additive (AM) utilisant des alliages d'acier. L'étude devrait démontrer de manière exemplaire comment les chaînes de processus changent qualitativement et quantitativement, entre autres sous l'influence de la fabrication additive



Cette étude exploratoire porte sur six chaînes de processus sélectionnées dans l'industrie de l'acier en Suisse. Elle identifie les aspects énergétiques pertinents et montre les effets des changements dans la chaîne de processus, y compris l'utilisation de AM, sur la consommation d'énergie

- AM sur lit de poudre
- Coulée de fonte avec moules AM
- Production hybride avec usinage
- Dégainage et usinage par le décolletage
- Traitement des tôles
- Construction en acier

Les trois premières chaînes de processus sont directement liées à l'AM. Elles ont fait l'objet d'une analyse complète et d'une évaluation quantitative. Les trois autres chaînes de processus représentent des chaînes de processus à forte intensité de matière, c'est-à-dire à haut débit de matière, ou elles ont le potentiel d'éliminer des étapes de processus établies telles que la trempe. Elles n'ont fait l'objet que d'une évaluation qualitative, et partiellement quantitative, limitée par les informations disponibles.

Pour chaque chaîne de processus, une évaluation énergétique a été réalisée sous la forme d'un diagramme de processus. Pour chaque étape du processus, le besoin en énergie a été déterminé et attribué à la pièce sous forme d'énergie grise. Les pertes de matériaux causées par le processus de fabrication, les rebuts, les pertes de stockage, etc. ont également été visualisés.

L'étude des différentes chaînes de processus montre que les différentes étapes de valeur ajoutée présentent parfois des taux de recyclage élevés, par exemple lors du décolletage, de la construction en acier (avec poutres en acier) ou du traitement de la tôle (découpe laser, étampage). La partie recyclée de la matière est la cause principale de l'énergie grise des pièces fabriquées. Elle conduit à un réseau étroitement imbriqué de recyclage et de réutilisation, tant au sein d'une entreprise que d'une entreprise à l'autre. L'utilisation de pièces brutes proche de la forme finale permet de réduire la consommation d'énergie. Si la ferraille est inévitable en raison du procédé, le recyclage doit considérer le type de la matière exacte.

L'impacte de l'AM sur lit de poudre sur la consommation d'énergie n'est pas pertinente aujourd'hui et dans un avenir prévisible en raison de la trop faible quantité produite à l'aide de ce procédé. Par contre, l'AM a déjà trouvé sa place dans la fonderie, par exemple en tant que technologie permettant des nouvelles réalisations jusqu'à lors trop coûteuse ou impossible. D'un point de vue énergétique, la réutilisation et le réusinage des pièces est très intéressante. Dans ce domaine, l'AM peut exercer un fort effet de levier sur la création de valeur, comme le montre l'exemple de la production hybride lors de la révision d'aubes ou de buses de turbine usées.

En résumé:

- Le concept d'énergie grise est viable. Il montre la pertinence des différentes étapes du processus en ce qui concerne la consommation d'énergie.
- L'énergie grise de la pièce est principalement déterminée par l'efficacité de l'utilisation de la matière. Même les procédés de fabrication les plus énergivores contribuent moins à l'énergie grise que les pertes de matière. L'analyse du cycle de vie ne doit pas être basée sur la quantité de matière dans la pièce finie, mais doit tenir compte de la perte totale de matière et de son recyclage.
- L'AM sur lit de poudre répond peu aux exigences d'une production efficace en termes d'utilisation de la matière, moins que des chaînes de processus hybrides sélectionnées qui



combinent intelligemment l'AM et l'usinage classique. La réutilisation directe des pièces usées comme ébauche est particulièrement intéressante. Il s'agit de cas particuliers dans tout le spectre du traitement de l'acier. Cependant, les avantages sont si impressionnants qu'une recherche ciblée dans cette direction porterait ses fruits.

- Dans le cas de chaînes de processus à grand débit de matière, même de petits changements peuvent avoir des effets majeurs en raison des économies d'échelle importantes. Dans le traitement de la tôle, c'est surtout le recyclage des rebuts en fonction de leur valeur par des méthodes comme *Lean* et l'*Industry 4.0*. Dans la construction en acier, c'est la réutilisation ciblée de produits semi-finis et d'assemblages complets. L'efficacité de ces mesures suggère de poursuivre les recherches dans ce domaine.

L'étude a été appuyée par un groupe de soutien dont les membres sont des experts dans l'une des chaînes de processus étudiées. Cela a permis d'accéder à des informations pertinentes et actuelles.

Summary

Steel processing in Switzerland is partly a cyclical process, maintained with electricity and gas. Two steelworks (Swiss Steel in Emmenbrücke and Stahl Gerlafingen) produce around 1.3 million tons of semi-finished steel products annually from scrap, which corresponds to the quantity of scrap iron in Switzerland. Steel processing takes place over several stages in process chains, some with high added value.

The focus of energy optimization so far was on the energy requirements of individual production steps along the value chain, i.e. on efficiency. The energy requirement for the provision of raw parts or semi-finished products, the processing of product scrap and the question of whether process steps can be substituted or rendered obsolete by changes in the process chain were excluded.

The study provides an initial basis for an overall assessment of the energy consumption of selected process chains. The trigger for this study is the increasing importance of additive manufacturing (AM) in steel processing. It shall be shown exemplarily how process chains change qualitatively and quantitatively, also under the influence of AM.

This explorative study deals with six selected process chains in the steel processing industry in Switzerland. It identifies the energy-relevant aspects and shows the effects on energy consumption of changes in the process chain, including the use of AM:

- AM in the powder bed
- Iron casting with AM molds
- Hybrid production with machining
- Blank drawing and processing by turning
- Sheet metal processing
- Steel construction

The first three process chains are directly related to AM. They were fully analyzed and quantitatively evaluated. The other three process chains represent process chains with high material intensity, i.e. high material throughput, or they have the potential to eliminate established process steps such as hardening. They were evaluated qualitatively only partially quantitatively, restricted by the available information.



For each process chain, an energetic evaluation was made in the form of a process diagram. For each individual process step, the energy requirement was determined and assigned to the workpiece as grey energy. The material loss caused by the manufacturing process, cut-offs, rejects, storage losses, etc. was also depicted.

An examination of the individual process chains shows that the various value-added stages sometimes have high recycling rates, for example when turning from bar stock (décolletage), steel construction (with steel girders) or sheet metal processing (laser cutting, punching). The recycled material is the main driver for the grey energy of the manufactured parts. It leads to a closely interwoven network of recycling and reutilization, both within a company and across companies. The energy requirement in steel processing can be reduced by using near-net-shape raw parts. If material losses are unavoidable due to the process, the material should be recycled correctly sorted.

The influence of AM in the powder bed on energy consumption in steel processing is irrelevant today and in the foreseeable future due to the low overall share. But additive processes have for instance gained a foothold in iron casting as enabling technology. From an energetic point of view, the reuse and rework of workpieces is highly interesting. Here AM can unfold a high leverage effect on value creation, as shown by the example of hybrid production in the refurbishment of worn turbine blades or nozzles.

In summary, it is stated:

- The concept of grey energy is viable. It shows the relevance of the individual process steps with regard to energy consumption.
- The grey energy of the workpiece is primarily determined by the efficiency of the material use. Even the most energy-intensive manufacturing processes contribute less to grey energy than material losses. Life Cycle Assessments must not be based on the amount of material in the finished part but must take into account the total loss of material and its recycling.
- AM in the powder bed meets the requirements of material-efficient production less than selected hybrid process chains which cleverly combine AM and machining. The direct reuse of worn parts as blanks is particularly fortunate. These are special cases in the entire spectrum of steel processing. However, the advantages are so impressive that targeted research in this direction would pay off.
- In the case of material-intensive process chains, even small changes can cause major effects due to the large economies of scale. In sheet metal processing, it is particularly important to ensure that the process is suitable for the value of the material.

The study was supported by a group of experts, each in one of the process chains examined. This approach gave access to relevant information.





Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	4
Summary	6
Inhaltsverzeichnis	9
Definitionen und Abkürzungen	11
1 Ausgangslage	12
1.1 Einleitung.....	12
1.2 Mengengerüst Stahl Schweiz.....	12
1.3 Prozessketten in der Schweizer Stahlverarbeitung	13
1.4 Prozesskettenbeschreibung	14
1.5 Wirtschaftliche Rahmenbedingungen	15
1.6 Ziele der Studie	16
2 Auswahl exemplarischer Prozessketten	16
2.1 Kriterien zur Auswahl der Prozessketten	16
2.2 Methodische Hinweise	18
2.3 Fachtechnische Begleitgruppe	18
3 Prozesskettenanalyse	19
3.1 Grundlagen.....	19
3.2 Prozesskette AM im Pulverbett	21
3.2.1 Einführung	21
3.2.2 Prozesskette.....	22
3.2.3 Energiebetrachtung	22
3.2.4 Entwicklungspotenzial	23
3.3 Prozesskette Eisenguss mit AM Formen	24
3.3.1 Einführung	24
3.3.2 Prozesskette.....	25
3.3.3 Energiebetrachtung	25
3.3.4 Entwicklungspotenzial	26
3.4 Prozesskette Hybridfertigung mit Zerspanung.....	27
3.4.1 Einführung	27
3.4.2 Prozesskette.....	28
3.4.3 Energiebetrachtung	28
3.4.4 Entwicklungspotenzial	29
3.5 Prozesskette Décolletage von blankgezogenen Stangen	30
3.5.1 Einführung	30
3.5.2 Prozesskette und Entwicklungspotenzial.....	31



3.5.3	Energiebetrachtung	32
3.5.4	Energiebetrachtung	33
3.6	Prozesskette Blechverarbeitung	34
3.6.1	Einführung	34
3.6.2	Prozesskette.....	35
3.6.3	Energiebetrachtung	36
3.6.4	Entwicklungspotenzial	36
3.7	Prozesskette Stahlbau	38
3.7.1	Einführung	38
3.7.2	Prozesskette.....	38
3.7.3	Entwicklungspotenzial	39
4	Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen.....	41
5	Referenzen	43



Definitionen und Abkürzungen

Additive Fertigung AM: Verschiedene Verfahren, bei denen eine Form, die nahe der gewünschten Endform ist, meist durch schichtweisen Aufbau erzeugt wird. AM steht als Abkürzung für den englischen Begriff Additive Manufacturing.

CAM-System: Computer Aided Manufacturing. Softwarelösungen zur Arbeitsvorbereitung, welche aus dem Volumenmodell des Werkstücks die Instruktionen für die Bearbeitung generieren.

Graue Energie: Bezeichnet die Energiemenge, die für Herstellung, Transport, Lagerung, Verkauf und Entsorgung eines Produktes benötigt wird. Dabei werden auch alle Vorprodukte bis zur Rohstoffgewinnung berücksichtigt und der Energieeinsatz aller angewandten Produktionsprozesse addiert. Sie wird als spezifische Grösse in [MJ/kg] angegeben.

Halbzeug: Zwischenstufe in der Stahlverarbeitung. Halbfabrikate mit einfachen Formen und aus einem einzigen und definierten Werkstoff, die vom Handel angeboten werden und für die Bearbeitung, z. B. durch Umformung oder Zerspanung, den Ausgangspunkt bilden. Beispiele sind Rundstangen, Bleche, Blöcke, Profile, etc.

HRC: Härte nach Rockwell, Skala C, wobei die Eindringtiefe eines Diamantkegel bei einer definierten Kraft gemessen wird. Das Verfahren ist in ISO 6508-1 international genormt.

LMD: Additive Fertigung durch Schichtauftrag (Laser Metal Deposition)

Near Net Shape: Prozess, der nahe zur Endkontur führt. AM wird eingeschränkt auf Verfahren, welche diese Bedingung erfüllen, da sie sonst gegenüber der Fertigung ausgehend von Halbzeug keinen Vorteil aufweisen.

Nutzen 1., 2. und 3. Art: Nutzen 1. Art resultiert aus Verbesserungen bei der Herstellung und Entsorgung/Recycling von Produkten, Nutzen 2. Art entsteht durch verbesserte Nutzungseigenschaften des Produkts beim primären Kunden, und Nutzen 3. Art liegt vor, falls durch die veränderten Nutzungseigenschaften des Produkts (z.B. einer Werkzeugmaschine) bei dessen Kunden weiterführende Verbesserungen möglich werden (z.B. höhere Qualitäten in Lagersitzen und somit geringere Verluste bei den Produkten der „sekundären“ Kunden).

Prozesskette: Eine miteinander verbundene respektive voneinander abhängige Abfolge von Bearbeitungsschritten.

Recycling: Genereller Begriff für die Rückführung von Material im Kreislauf. Es werden verschiedene Formen unterschieden (vgl. VDI 2243 [5]):

- **Wiederverwendung:** bereits gebrauchte Produkte werden für denselben Zweck erneut verwendet, mit Aufarbeitung
- **Weiterverwendung:** bereits gebrauchte Produkte werden für einen anderen als den ursprünglichen Zweck weiterverwendet, mit Aufarbeitung
- **Wiederverwertung:** erneuter Einsatz von Altstoffen und Produktionsabfällen in einem gleichartigen Produktionsprozess (z.B. Kreislaufmaterial im Giessprozess)
- **Weiterverwertung:** Einsatz von Altstoffen und Produktionsabfällen in einem von diesen noch nicht durchlaufenen Produktionsprozess, wodurch andere Werkstoffe oder Produkte mit anderen Eigenschaften entstehen (z.B. Verwendung von Kupolschrott im Eisenguss)

SSHV Schweizerischer Stahl- und Haustechnikhandelsverband



1 Ausgangslage

1.1 Einleitung

Die **Entwicklung des Stahls** ist eine bedeutende Leistung der Menschheit, die letztere aus der Frühgeschichte – der Eisenzeit – bis in die heutige Zeit geleitet und begleitet hat. Diese Entwicklung hält auf hohem Niveau an. Die Schweiz hat eine **bedeutende und im internationalen Vergleich hochstehende stahlverarbeitende Industrie**:

- Das **Altmetall** (=niedriglegierter Stahl) der Schweiz wird in zwei Stahlwerken eingeschmolzen.
- Die **Zulieferindustrie** verarbeitet Stahl zu hochwertigen Komponenten.
- **Werkzeugmaschinen** von Schweizer Herstellern gehören zu den weltweit führenden Lösungen in der Stahlbearbeitung.
- Die **Bauwirtschaft** setzt auf Stahlkonstruktionen und auf Stahlbeton und verwendet dafür rund die Hälfte des Landesverbrauchs in zahlreichen Formen.

1.2 Mengengerüst Stahl Schweiz

Laut Branchenangaben beträgt der **Stahlverbrauch** der Schweiz rund **2.7 Mio. Tonnen pro Jahr**. Aus der publizierten Stahlproduktion durch die **beiden Stahlwerke von rund 1.3 Mio. Tonnen** sowie einer Importdifferenz von 1.16 Mio. Tonnen erschliesst sich diese Zahl nicht ganz (Differenz rund 0.25 Mio. Tonnen), auch unter Berücksichtigung von 0.04 Mio. t, die durch Giessereien erzeugt werden [1]. Die beiden Stahlwerke verwerten Schrott, wobei die Bedarfsmenge aus Konkurrenzgründen nicht ausgewiesen wird, nur über die produzierte Menge werden Aussagen gemacht. Offensichtlich kann der anfallende Schrott mehrheitlich in der Schweiz wiederverwertet werden, jedoch nicht vollständig, nach Zollstatistik 2018 wurden 0.232 Mio. Tonnen mehr exportiert als importiert.

In der Zollstatistik (Tabelle 1) wird auch offenkundig, dass in der Schweiz **keine Bleche** hergestellt werden, sondern vollumfänglich importiert und nur Restmengen exportiert. Anders sieht es bei **Walzdraht und Stabstahl** aus. Dies werden im Stahlwerk in Emmenbrücke hergestellt und führen zu einem Exportüberschuss. Weniger ausgeprägt ist der Exportüberschuss bei den Profilen, die ebenso wie Armierungsstahl in Gerlafingen hergestellt werden, total rund 0.625 Mio. Tonnen pro Jahr [2], hauptsächlich für den Inlandbedarf, was den Bedarf jedoch nicht deckt. Das erklärt den Nettoimport von 0.423 Mio. Tonnen Armierungsstahl.



Tabelle 1: Zusammenzug aus der Zollstatistik 2018 [3]

Material (Angaben in Mio. Tonnen)	Import	Export	Import Netto	Export Netto
Schrott	0.490	0.722		0.232
Rohstahl, Knüppel	0.024	0.081		0.058
Diverses	0.014	-	0.014	
Roheisen, Schrott, Halbzeug	0.528	0.804	0.014	0.289
Stahlbleche (>= 600 mm)	0.309	0.006	0.302	
Spaltband in Rollen (< 600 mm)	0.146	0.007	0.139	
Stahlbleche verzinkt, lackiert, etc.	0.209	0.007	0.201	
Diverse und anders legierte Flachprodukte	0.357	0.079	0.278	
Walzdraht	0.073	0.174		0.101
Flach-, Vierkant-, Rund-, und Stabstahl	0.134	0.318		0.184
Verschiedene Langprofile	0.288	0.126	0.162	
Flach- und Langprodukte	1.516	0.718	1.083	0.285
Röhren/ Hohlprofile	0.172	0.231		0.059
Armierungsstahl	0.505	0.081	0.424	
Summe Roheisen, Schrott, Halbzeug	0.528	0.804	0.014	0.289
Summe Flach- und Langprodukte, Röhren/ Hohlprofile, Armierungsstahl	2.192	1.030	1.507	0.344
Total	2.720	1.834	1.521	0.634

1.3 Prozessketten in der Schweizer Stahlverarbeitung

Die Stahlverarbeitung umfasst eine Vielzahl von verschiedenen Prozessketten, alle mit dem Ziel, von einem Ausgangsprodukt zu einem Endprodukt zu gelangen. Sowohl das Ausgangsmaterial, die Stahllegierungen, wie die Verarbeitungsschritte, sind einer permanenten und seit Beginn des industriellen Zeitalters einer beschleunigten Entwicklung unterworfen. Einige Prozessschritte sind nur im grossen industriellen Massstab überhaupt möglich oder wirtschaftlich, was zu einer starken **Internationalisierung** geführt hat. Der betrachtete Bereich, die Prozessketten in der Stahlverarbeitung in der Schweiz, ist deshalb aus Prozesssicht ein **willkürlicher Ausschnitt**. Die beiden Schweizer Stahlwerke, ebenso wie die Giessereien, sind im Vergleich zu ausländischen Firmen verhältnismässig klein und nur dank Fokussierung auf Nischenprodukte überlebensfähig. Diese Nischenprodukte werden zum Teil exportiert, und gleichzeitig werden Halbzeuge (z. B. Bleche) oder Profile (z. B. Eisenbahnschienen) in grossen Mengen importiert, weil es in der Schweiz kein entsprechendes Walzwerk gibt.

Die 1.3 Mio. Tonnen in der Schweiz hergestellten Stähle entfallen zur **Hälfte auf den Baubereich** (Bewehrungsstähle, vor allem Stahl Gerlafingen) [2] und zur Hälfte auf eine Vielzahl von Anwendungen in Maschinen und Geräten (vor allem Swiss Steel). Selbstredend beliefern die beiden Schweizer Stahlwerke nicht nur den Schweiz Markt. Rohstoff für die Stahlwerke ist Altmetall, genauer Eisenschrott. Export und Import des Eisenschrotts aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen halten sich ungefähr die Waage, so dass vereinfacht davon ausgegangen werden kann, dass die Stahlwirtschaft in der Schweiz ein Kreislaufprozess ist, der mit elektrischer Energie betrieben wird. Der Inlandverbrauch



der Schweiz liegt rund doppelt so hoch wie die Produktion durch die genannten Stahlwerke. Ein grosser Teil der importierten Stahlmenge sind Bleche, die in der Schweiz überhaupt nicht hergestellt, jedoch vielfältig verarbeitet werden.

Die Stahlwerke erzeugen **Rohlinge**, die mit weiteren Prozessschritten wie Walzen zu **Halbzeug** verarbeitet werden. Ein Beispiel sind blankgezogene Stangen mit eng tolerierten Abmessungen und spezifischen Materialeigenschaften, wie sie von der Décolletageindustrie verarbeitet werden. Aus Halbzeugen entstehen durch Bearbeitungen wie **Umformen oder Zerspanen** Fertigteile, wobei **Materialverluste von bis zu 50%** oder mehr anfallen. Selbstredend gehen die Produktionsabfälle direkt wieder in den Kreislauf, während die Werkstücke unter Umständen eine jahrzehntelange Nutzungsphase absolvieren, bevor sie wieder eingeschmolzen werden. Zu den Stahlwerken hinzu kommen **Giessereien**, welche jährliche gegen 40'000 Tonnen Eisen- und Stahlguss herstellen [1].

Im Rahmen der Produktentwicklung werden durch die Ausgestaltung einzelner Teile und Baugruppen ganze Prozessketten vorbestimmt. Gemeinhin wird davon ausgegangen, dass in der Entwicklungsphase 70% und mehr der Kosten bereits festgelegt werden. Analoges gilt für den Energiebedarf. Es stellt sich deshalb die Frage, welche Schritte in der Prozesskette für bestimmte Produktionsaufträge energetisch überwiegen.

Eine **Veränderung in einer Prozesskette** kann beträchtliche Auswirkungen auf den Energieverbrauch in der Schweiz haben, sei es, dass energieintensive Schritte ins Ausland verlagert werden, oder umgekehrt. Dabei handelt es sich nicht zwangsläufig um eine geographische Verlagerung. Wie in der Folge unter anderem gezeigt werden wird, sind veränderte Abfolgen oder Substitutionen und Veränderungen von einzelnen Prozessschritten möglich, welche den Energiebedarf stark beeinflussen können. Aus wirtschaftlichen und logistischen Gründen sind kürzere Prozessketten vorteilhaft. Mit dem Wegfall eines Prozessschritts kann der Energieverbrauch oft, aber nicht immer, reduziert werden.

1.4 Prozesskettenbeschreibung

Als **universeller Bezugsrahmen** für die Prozessketten wird die Beschreibung nach der Norm DIN 8580 herangezogen (Abbildung 1).

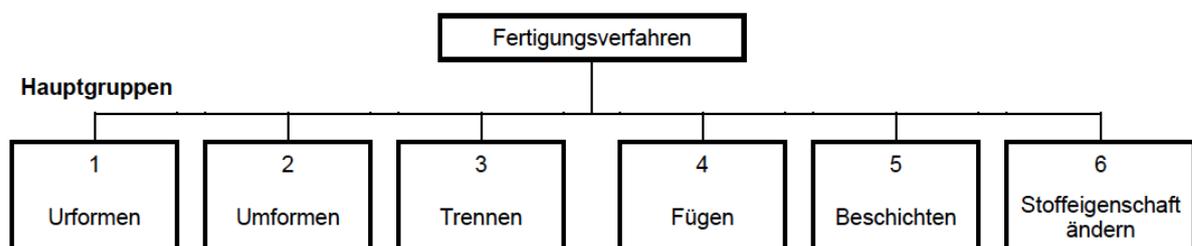


Abbildung 1: Hauptgruppen der Fertigungsverfahren, Auszug aus DIN 8580

Zur Erläuterung seien einige bekannte Beispiele aus der Stahlverarbeitung genannt:

- 1 Urformen: Eisen- und Stahlguss von teilespezifischen Rohlingen; Herstellung von Brammen (Blöcken) im Stranggussverfahren
- 2 Umformen: Walzen von Profilen oder Blechen aus Brammen; Formen von Teilen aus Blech; Blankziehen von Stangen oder Drähten; Kalt- oder Warmumformen ab Draht.
- 3 Trennen: Zerspanung wie Sägen, Fräsen, Drehen, Bohren, Laserschneiden.
- 4 Fügen: Verschrauben, Schweissen, Löten, Nieten, Kleben.
- 5 Beschichten: Lackieren, Bedampfen, Auftragsschweissen.



6 Stoffeigenschaft ändern: Verfestigen, Härten, Magnetisieren.

Diese Hauptgruppen stellen **keine sequenzielle Abfolge** dar, obschon es in der Praxis so sein kann, dass beispielsweise Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten in Einzelfällen tatsächlich in dieser Abfolge auftreten. So kann beispielsweise ein Vorgang aus Hauptgruppe 6, Stoffeigenschaften ändern, ein Aspekt des Umformprozesses (2) sein. Ebenso abhängig vom Einzelfall ist, wie häufig ein Vorgang der Hauptgruppen in der gleichen Prozesskette auftritt. So kann bereits ein Halbzeug mehrere Umformschritte durchlaufen haben, bevor daraus mit weiteren Umform- und meist auch Trennprozessen und ggf. weiteren Prozessschritten ein fertiges Bauteil entsteht.

Die **Additive Fertigung** (Additive Manufacturing AM) lässt sich mit etwas Phantasie in die Verfahren nach DIN 8580 einordnen. Es wird dabei aber offenkundig, dass sie einen Sonderfall darstellen, der bei der Entstehung dieses Bezugsrahmens nicht präsent war. Viele Additive Verfahren erzeugen eine Urform, der angewandte Prozess findet sich jedoch eher in den Hauptgruppen 5 oder 6. Die Anwendbarkeit der Norm ist damit nicht eingeschränkt. Gerade dieser Fall zeigt, dass die Stahlverarbeitung äusserst vielfältig und in ständiger Entwicklung begriffen ist, die sich nur begrenzt in einen statischen Bezugsrahmen zwängen lässt. Hinzu kommt der ständige Wandel des Ausgangsmaterials, der Stahls selbst, von dem Jahr für Jahr zahlreiche weitere Varianten entwickelt werden, welche wiederum zu anderen Prozessketten führen.

1.5 Wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Produktion geschieht in engen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Die technische Wahl der **Verfahren** ist mehrheitlich **bestimmt durch die Wirtschaftlichkeit**, gegeben durch Investitions- und Betriebskosten, nicht durch die technische Machbarkeit. Deshalb kann ein Grossteil der Prozessketten nur durch wirtschaftliche Einflüsse erklärt werden, nicht durch technische Erfordernisse. Hingegen kann technische Pfadbildung, beispielsweise die Etablierung von Halbzeug wie Bleche oder Profile zur Verfestigung der Prozessketten beitragen.

Typische Optimierungsachsen in der Stahlverarbeitung:

Produkt

- Produktfunktion erhöhen
→ Komplexere Werkstücke (mehr Funktionen integriert), modulare Konzepte (mehr Interfaces)
- Qualität halten/erhöhen
→ Materialeigenschaften verbessern, selektive Qualitätsoptimierung

Flexibilität

- Reaktionszeit verkürzen
→ Zahl der Geschäftsgelegenheiten steigern
- Losgrösse verringern
→ Bedarfsgerechte Fertigung

Prozessbeherrschung

- Standardisierung
→ Rückgriff auf etablierte Verfahren und Technologien, Verwendung von Standardhalbzeug
- Differenzierung im Markt
→ Aufbau von spezifischem Knowhow für einzelne Schritte in der Wertschöpfung



Kosten

- Produktionskosten senken
→ Personal reduzieren / Automatisieren; Prozesseffizienz erhöhen
- Kapitaleinsatz tiefer
→ Reduktion Ware in Arbeit, Tiefere Investitionen

Normative Ansprüche

- Gesetzliche Anforderungen: Anwendungsbezogen korrekte Wahl der Legierung
- Produktdokumentation: Rückverfolgbarkeit

1.6 Ziele der Studie

Der bisherige Fokus energetischer Optimierungen lag auf dem **Energiebedarf einzelner Produktionsschritte** entlang der Wertschöpfungskette, also auf der Effizienz. Ausgeklammert blieben dabei der Energiebedarf für die Bereitstellung der Rohteile resp. Halbzeuge, die Aufarbeitung des Produktionsschrotts und die Frage, ob durch Änderungen der Prozesskette Prozessschritte substituiert oder obsolet werden können (vgl. [13,14]).

Die Studie erstellt eine erste Grundlage für die **übergreifende Beurteilung des Energieverbrauchs** ausgewählter Prozessketten. Auslöser für diese Auslegeordnung ist die zunehmende Bedeutung von AM in der Stahlbearbeitung. Es soll exemplarisch aufgezeigt werden, wie sich Prozessketten qualitativ und quantitativ verändern, auch unter dem Einfluss von AM.

Bewusst bleibt dabei die **Funktionsbetrachtung der Werkstücke ausgeklammert**. Die Studie beurteilt nicht, ob die Werkstücke für ihre Funktion die energieeffizienteste Lösung darstellen. Es kann sein, dass sie bei einer Funktionsbetrachtung durch andere Materialien substituiert oder obsolet sein könnten. Falls sie Teil eines aktiven Systems sind ist zudem ihr Gewicht oder ihr Einfluss auf den Wirkungsgrad des Systems, Nutzen 3. Art genannt, von hoher Bedeutung [15]. Diese Einschränkung ist bedeutend, weil gerade diese Aspekte, extremer Leichtbau oder gesteigerter Wirkungsgrad, die Hauptmotivation zum Einsatz additiver Fertigungsverfahren sind. Der Nutzen 3. Art kann jedoch nur fallweise mit einer kombinierten Betrachtung von Prozesskette und Funktion beurteilt werden [16-20], was den Umfang dieser Studie sprengt.

2 Auswahl exemplarischer Prozessketten

2.1 Kriterien zur Auswahl der Prozessketten

Folgende Kriterien wurden bei der Auswahl exemplarischer Prozessketten berücksichtigt:

- i) Die **Menge M**, den Anteil am gesamten Stahlverbrauch
- ii) Die **Zahl Z** der Ver- und Bearbeitungsmöglichkeiten (Maschinen / Anlagen) in der Schweiz
- iii) Das **Innovationspotenzial I** der Prozesskette
- iv) Die Höhe der **Wertschöpfung W** (berücksichtigt auch einen allfälligen Mehrwert in der Anwendung der Produkte)

Das Innovationspotenzial wurde nicht ausschliesslich, aber mit einem Fokus auf den Energieaspekt beurteilt.



Tabelle 2: Liste betrachteter Prozessketten

Relative Bewertungsskala: - / 0 / +

	CH Akteure Hersteller CH Akteure Verarbeiter	M	Z	I	W	Beurteilung
Bewehrungsstahl (Armierungseisen, Draht oder Stange)	Stahlwerk Gerlafingen; Swiss Steel Hoch- und Tiefbau	+	0	0	-	Grosse Menge, aber alle weiteren Aspekte aus Prozesskettensicht wenig interessant
Stahlbau (T-Profile)	Keine Produktion in der Schweiz Metallbau (Hoch- und Tiefbau)	+	+	0	0	Bedeutende Menge. Innovation liegt in Geschäftsmodellen, die eine anders gelagert Betrachtung benötigen.
Fertigung ab Stange oder Draht	Swiss Steel (Schmelzen + Walzen) plus Blankziehen (Steeltec) Décolletageindustrie Kaltmassivumformer	0	0	+	+	Relevante Menge, typische CH Prozesskette mit vielen Verarbeitern in der Schweiz; hohes Innovationspotenzial mit der Variante Blankziehen
Additive Fertigung im Pulverbett	Keine Pulverproduktion in der Schweiz Spezialisierte AM-Fertiger, Industriebetriebe	-	-	+	+	Irrelevante Menge, wenige Akteure, hohe Wertschöpfung und Innovationspotenzial; berücksichtigt als typisch AM
Eisenguss, nachbearbeitet	Div. Giessereien Industrie, Fertigungsbetriebe	0	+	0	+	Eher kleine Menge, sehr typische Prozesskette, mit AM erhöhte Wertschöpfung
Hybridfertigung	Bedeutende Anbieter für Technologie Thermisches Spritzen Einzelne spezialisierte Anwender	-	-	+	+	Nischenanwendungen; bedeutendes Innovations- und Wertschöpfungspotenzial
Blechverarbeitung	Keine CH Hersteller Zahlreiche Verarbeiter: Stahlbauer, Stanzeroien	0	+	0	0	Bedeutende Menge, grosser Verschnitt mit Innovationspotenzial in der Materialausnutzung, mittlere bis hohe Wertschöpfung

Einer besonderen Begründung bedarf, weshalb auf zwei volumenmässig bedeutende Prozessketten nicht resp. nur teilweise eingetreten wurde:

- **Bewehrungsstahl / Armierung:** Beim klassischen, niedriglegierten Bewehrungsstahl besteht in der Nutzung die Gefahr der Korrosion; diese tritt beispielsweise auf, falls die Überdeckung mit Beton zu gering oder die Belastung des Bauwerks gross war. Swiss Steel produziert in diesem Bereich deshalb gezielt auch höherlegierte Stahlsorten. Damit wird eine längere Lebensdauer des Bauwerks garantiert. Bezüglich der grauen Energie im Produkt ein interessanter Anwendungsfall. Eine Zusammenarbeit in einem laufenden Entwicklungsprojekt wäre für beide, Swiss Steel und die



vorliegende BfE-Studie, interessant gewesen. Die unterschiedlichen Zeitpläne konnten jedoch nicht synchronisiert werden, so dass ein gemeinsames Vorgehen nicht möglich war.

- **Stahlbau:** In Kapitel 3.7 wird auf diese Prozesskette qualitativ eingegangen. Für eine belastbare quantitative Bewertung ist hingegen eine enge Zusammenarbeit mit einem grossen Stahlbauer zwingend. Mit der Firma H. Wetter AG in Stetten (AG) ist ein interessierter Partner vorhanden. Die Branche selbst will aufzuzeigen, welche ökologischen Verbesserungen eine industrielle Fertigung bringen könnte. Die vorgesehene *Lean-Six-Sigma*-Studie hat sich jedoch verzögert und deshalb konnten diese Erkenntnisse nicht berücksichtigt werden. Die Prozesskettenanalyse bei der H. Wetter AG wird aktuell mit einer Reffnet.ch-Unterstützung (Förderprogramm des BAFU) durchgeführt; die Resultate werden Ende Juli 2019 erwartet.

2.2 Methodische Hinweise

In der vorliegenden Studie werden **ganze Prozessketten** betrachtet. Je nach Zusammenspiel einzelner Bearbeitungsschritte, welche in der Praxis vielfach isoliert betrachtet und optimiert werden, resultieren unterschiedliche Auswirkungen auf Qualität, Kosten und auch Energiebedarf. Zudem hat die Sicht auf die ganzen Prozessketten den entscheidenden Vorteil, dass der direkte Kundennutzen sichtbar bleibt. Die Sicht auf einzelne Prozesse steigert die Effizienz, eine prozesskettenbezogene Sicht jedoch die Effektivität.

Prozessketten zu optimieren ist weit **anspruchsvoller als die Optimierung von einzelnen Prozessschritten**; mit jeder Wahl von einem weiteren Prozessschritt ändert sich die Ausgangslage für die folgenden Prozessschritte. Gerade diese Tatsache macht die Sicht auf ganze Prozessketten respektive die Berücksichtigung von bestimmten Verarbeitungstechnologien und die Auswirkungen auf vor- und nachgelagerte Bearbeitungsschritte sehr interessant.

In Bezug auf die graue Energie berücksichtigt diese Studie die Energie im Material respektive der Energiebedarf für das Recycling des abgetragenen Materials in der Fertigung. Der Fokus der Studie liegt auf dem **Energiebedarf**. Andere Aspekte, wie z.B. Durchlaufzeit, Stückkosten, etc. werden nicht oder nur summarisch berücksichtigt.

2.3 Fachtechnische Begleitgruppe

Die Auswahl exemplarischer Prozessketten erfolgte in Zusammenarbeit mit einer fachtechnischen Begleitgruppe, die sich wie folgt zusammensetzt:

- Giessereibranche: Eric von Ballmos, Benninger Guss AG
- Hybridfertigung: Philipp Jutzi, Stellba AG
- Stahlbau: Myriam Spinnler, Stahlbau Zentrum Schweiz
- Stahlbranche: Andreas Steffes, Handel Schweiz SSHV/ASCA

Zudem wurden die folgenden Fachpersonen zu weiteren Prozessketten befragt, mit Besuchen vor Ort, schriftlich und/oder telefonisch:

- Stahlwerk: Swiss Steel (strategischer Materialeinkauf im Hinblick auf effiziente Stahlherstellung in der Schweiz): Daniel Jung
- Halbzeuge, blankgezogener Stahl: Steeltec, Guido Olschewski
- Stanzen, Biegen, Laserschneiden: TRUMPF Maschinen, Tobias Meck



3 Prozesskettenanalyse

3.1 Grundlagen

Jede Prozesskette wird nach einer gleichbleibenden Struktur dargestellt und bewertet, ausgehend von einem Blockdiagramm. Abbildung 2 zeigt ein typisches Beispiel eines Werkstücks, das aus einem Halbzeug durch Zerspanung hergestellt, verbaut, genutzt und schliesslich recycelt wird. Bei der Erzeugung des Halbzeugs, bei der zerspanenden Fertigung und am Lebensende fällt Stahl zur Wiederverwertung an.

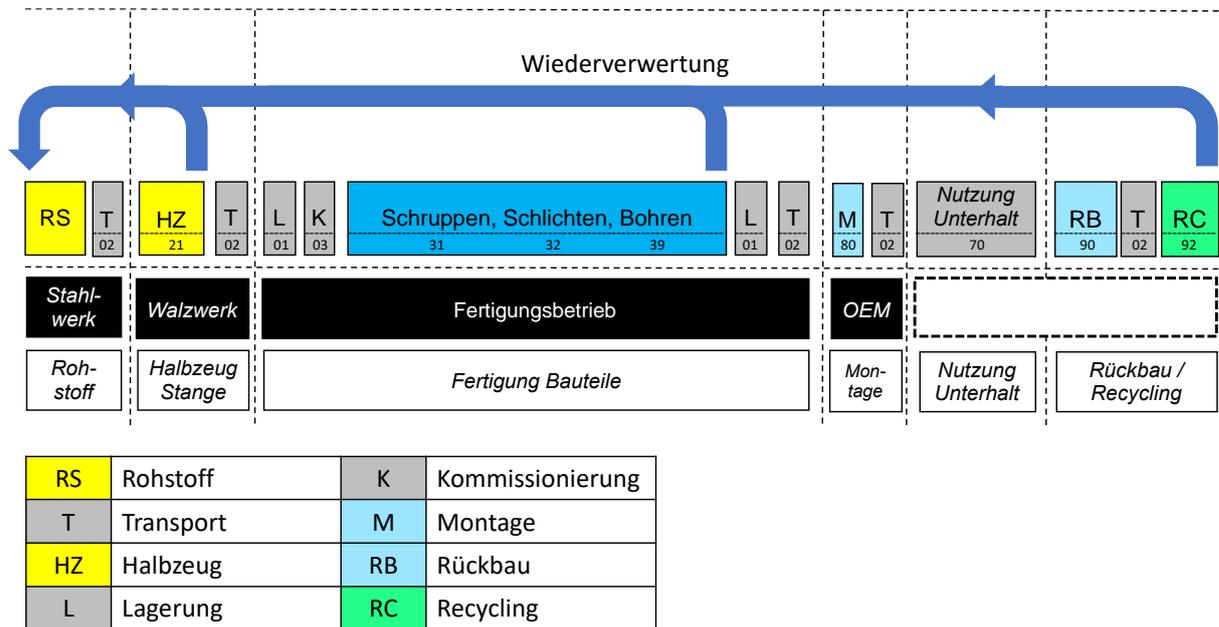


Abbildung 2: Balkendiagramm der einfachen Prozesskette von gewalztem Halbzeug aus Stahl mit zerspanender Bearbeitung. Die Nummern der Prozessschritte sind in Tabelle 3 aufgeschlüsselt.

In einer quantitativen Beurteilung kann die Energie, welche für die einzelnen Prozessschritte notwendig ist, als graue Energie dem Werkstück zugerechnet werden, siehe die linke Skala und die schwarzen Kurve in Abbildung 3. Bemerkenswert ist, dass bei der Zerspanung ein relevanter Teil des ursprünglichen Materials zu Spänen wird, die im Stahlwerk wiederverwertet werden. Dies ist offenkundig in Prozessschritt 31 in Abbildung 3. Der Materialverlust durch Zerspanung führt gleichzeitig zu einem Anstieg der grauen Energie, welcher der Energie für die Wiederverwertung der Späne entspricht, die in diesem Prozessschritt anfallen. Am Ende der Prozesskette, Prozessschritt 92, fällt der Materialanteil auf Null, da das Werkstück wiederverwertet wird, während die graue Energie mangels Werkstück nicht mehr ausgewiesen werden kann.

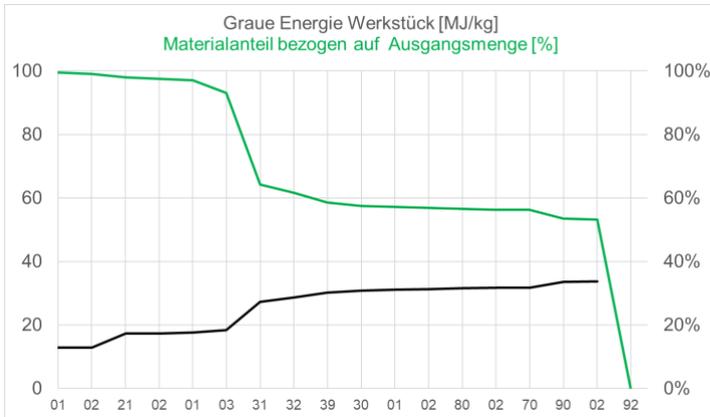


Abbildung 3: Einfache Prozesskette; Entwicklung der grauen Energie des Werkstücks und des Materialanteils bezogen auf die Ausgangsmenge

Um die Vergleichbarkeit der Prozessketten zu gewährleisten, werden die einzelnen Prozessschritte einheitlich nummeriert und jedem Schritt wird eine spezifische Energie zugeordnet (Tabelle 3).

Tabelle 3: Nummerierung der Prozesse und Energiewerte mit Quellenangabe

Num.	Prozesstyp	Energie [MJ/kg]	Quelle
0X	Logistik		
01	Lagerung	0.10	a)
02	Transport	0.01	[23]
03	Kommissionierung	0.10	a)
1X	Urformen		
11	Giessen inkl. Herstellung Form	6.00	a)
12	LMD	100.00	e)
13	Pulverherstellung	30.00	a)
14	AM Pulverbett/ SLM	100.00	[24]
2X	Umformen		
21	Walzen	4.20	[25]
3X	Trennen		
30	Ausschuss	0.00	a)
31	Schruppen	1.50	b)
32	Schlichten	3.00	b)
33	Schleifen	100.00	b)
34	Laserzuschnitt	0.30	c)
35	Ausformen (Eisenguss)	0.10	a)
36	Pulverbett Ausformen/ Sieben	0.20	a)
39	Bohren	2.00	a)
4X	Fügen		
5X	Beschichten		
51	Oberfläche (Blechverarbeitung)	2.00	a)
6X	Stoffeigenschaft ändern		
61	Anlassen	0.60	a)
62	Wärmebehandlung	6.00	d)
65	Blankziehen	0.20	[10]



7X	Nutzung		
70	Nutzung	0.00	a)
8X	Montage		
80	Montage	0.10	a)
9X	Rückbau		
90	Rückbau	0.20	a)
92	Zerlegung zum Recycling	0.60	a)
-	Rückführung durch Wiederverwertung	8.70	[26]
-	Ersatz Rest durch Rohmaterial	25.00	[26]
a) Schätzung der Autoren b) Messungen inspire AG beruhend auf [21, 22] c) Schätzung der Autoren, beruhend auf Messungen von inspire AG, 1mm Blech, 2x3m, 180s Prozesszeit, Leistung 80 kW inkl. Schutzgas d) Schätzung der Autoren, für Vergütungsprozess, 100m ³ Gas=1000 kWh + 210 kWh Strom (*3 für MJ Equivalent) e) Schätzung der Autoren, beruhend auf Messungen von inspire AG f) Expertenaukunft 2019-02-06			

Im Weiteren wird das Entwicklungspotenzial, z. B. durch AM, dargelegt. Schliesslich erfolgt eine relative Beurteilung der jeweiligen Prozesskette gegenüber der etablierten Fertigung. Die Beurteilungsaspekte wurden abgeleitet aus den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (siehe Kapitel 1.5.): Funktion, Materialqualität, Reaktionszeit, Losgrösse, Herstellkosten, gebundenes Kapital, Dokumentationsaufwand sowie Knowhow-Bedarf (vgl. z. B. Abbildung 6).

3.2 Prozesskette AM im Pulverbett

3.2.1 Einführung

Die Additive Herstellung im Pulverbett von Werkstücken aus Stahl, auch als SLM (Selective Laser Melting) bekannt, ist ein junges Fertigungsverfahren. Die Entwicklung zur industriellen Nutzung setzte vor etwa 20 Jahren ein, ab 1998 wurden zunehmend Patente angemeldet, und einige Jahre später folgten die ersten industriellen Nutzungen. Metallpulver wird schichtweise durch eine Rakel aufgetragen und durch einen Laser in den gewünschten Bereichen durch Aufschmelzen verfestigt. Aus Gründen der Wärmeleitung muss der aufgeschmolzene Bereich mit massivem Material unterlegt sein; der Aufbau muss deshalb auf einer Grundplatte beginnen, von der das Bauteil am Ende getrennt werden muss. Im Weiteren bedingen überhängende Formen Stützstrukturen, welche den Querschnitt schrittweise anwachsen lassen. Um Eigenspannungen zu verringern und die Materialqualität sicherzustellen, kommen der Strategie der Laserstrahlführung und der Wahl der Strahlparameter beim Aufschmelzen hohe Bedeutung zu.

Im Vergleich zu anderen Urformverfahren wie Giessen ist die Produktivität von AM im Pulverbett sehr gering. Deshalb eignet es sich für kleine und komplexe Formen und/oder die Einzelteillfertigung, da hier der Vorteile der werkzeuglosen Fertigung, der Gestaltungsfreiheit, des geringen Rüstaufwands und der hohen Flexibilität voll zum Tragen kommen, ohne dass sich die geringe Produktivität nachteilig auswirkt. Als Richtwert für die Obergrenze der wirtschaftlich interessanten Dimension kann *Schuhschachtelgrösse* gelten.

Das Rohteil entspricht dem Near Net Shape, benötigt aber in jedem Fall eine nachgelagerte mechanische Bearbeitung, um Stützstrukturen zu entfernen, um Gewinde und andere Schnittstellen anzubringen, oder um Genauigkeitsanforderungen zu erfüllen. Die Pulvergrösse kann in Grenzen



variiert werden, üblich sind Korngrößen von 10 bis 60 µm. Größere Körner erhöhen die Rauheit. Produktivitätsverbesserungen wurden in der Vergangenheit erzielt, indem die Fläche des Pulverbetts vergrößert und die Laserleistung und/oder -anzahl erhöht wurde.

3.2.2 Prozesskette

Ausgangsmaterial für das Verfahren (Abbildung 4) ist ein genau spezifiziertes Metallpulver, welches in der Regel durch Aufschmelzen und Verdüsen hergestellt wird. Da im Pulverbett nur ein Teil des Pulvers mit dem Laser verfestigt wird, fällt viel Pulver als Kreislaufmaterial an. Ein Teil des Pulvers (bis 7%) degeneriert durch Schweissgespritzer und die Bildung von Oxiden und wird durch einfaches Sieben aus dem Kreislauf entfernt. Der Rest kann mehrfach wiederverwendet werden, *wie oft* hängt dabei von den Anforderungen der Anwendung ab.

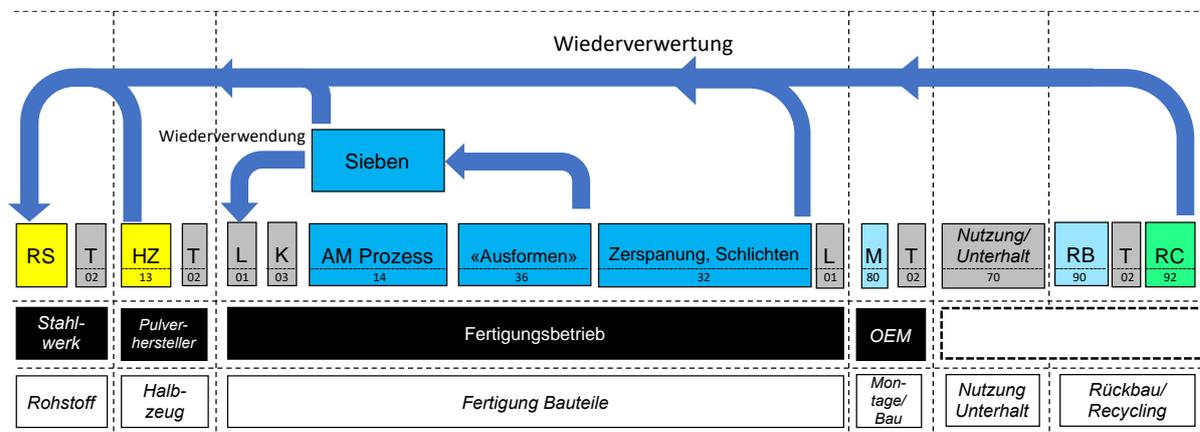


Abbildung 4: Prozesskette AM Pulverbett

3.2.3 Energiebetrachtung

Wenig überraschend ist der Energieaufwand für den AM-Prozess im Pulverbett (Schritt 14 in Abbildung 5) und für die Nachbearbeitung (Schritt 32) geradezu exorbitant hoch. Die Skala für die graue Energie (links in Abbildung 5) **weicht von allen nachfolgenden gleichartigen Darstellungen ab**. Die hohe graue Energie ist ein klarer Hinweis darauf, dass sich diese Prozesskette nur dann lohnen kann, wenn ein sehr hochwertiges Werkstück hergestellt wird. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn es Nutzen 3. Art, also während der Nutzungsphase erzeugt, zum Beispiel einen hohen Wirkungsgrad der Anwendung ermöglicht oder extremen Leichtbau, Aspekte, die in dieser Studie wie gesagt nicht berücksichtigt werden. Auffällig ist auch, dass entgegen der Erwartung eines bedarfsrechten Materialeinsatzes nur ein Drittel des eingesetzten Pulvers im Werkstück Nutzen findet. Dafür gibt es mehrere Gründe:

- der Beladungsfaktor, d. h. der Anteil des Pulvers, das aufgeschmolzen wird, beträgt nur 7-15%
- das nicht aufgeschmolzene Pulver kann nur teilweise wiederverwendet werden, pro Zyklus beträgt der Verlust bis zu 7%
- die prozessbedingten Stützstrukturen, die zerspanend entfernt werden müssen
- die Notwendigkeit der Nachbearbeitung für bestimmte Funktionen

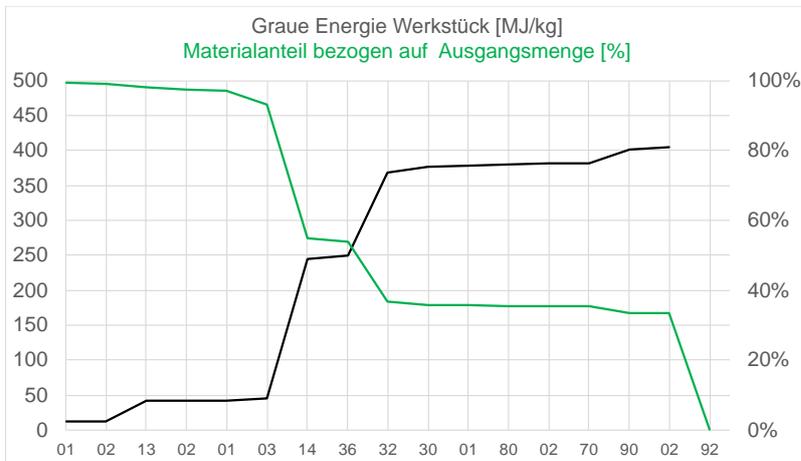


Abbildung 5: AM Pulverbett; Entwicklung der grauen Energie des Werkstücks und des Materialanteils bezogen auf die Ausgangsmenge

3.2.4 Entwicklungspotenzial

Die offenkundigen Vorteile von AM im Pulverbett haben grosse Hoffnungen an die künftige Entwicklung hervorgerufen:

- werkzeuglose und automatische Fertigung
- Near Net Shape bei höherer Gestaltungsfreiheit als alle anderen Verfahren der Stahlverarbeitung
- hohe Flexibilität: Einzelteile bis mittlere Stückzahlen und kurze Lieferzeit

Gleichzeitig können eine stetig bessere Materialqualität und geringere Eigenspannungen sichergestellt werden, und zwar mittels Strategien, die in den entsprechenden CAM-Systemen hinterlegt werden können. Volumenmässig ist AM im Pulverbett heute und in absehbarer Zukunft ein Nischenverfahren mit kaum messbaren Auswirkungen auf den Stahlkreislauf.

Aus energetischer Sicht sind die Aspekte Near Net Shape und bedarfsgerechte Fertigung relevant. Das energieintensive dreimalige Aufschmelzen des Stahls, im Stahlwerk, bei der Pulverherstellung und schliesslich im Pulverbett ist nachteilig, betrifft aber eine so kleine Stahlmenge, dass es in der Gesamtbetrachtung irrelevant ist. Der mit Abstand bedeutendste Aspekt ist die höhere Komplexität der gefertigten Teile, was Gewichtseinsparungen, mehr Funktionen und/oder höheren Wirkungsgrad in den Anwendungen ermöglicht, vorab bei kleinen Wertstücken. Dieser Nutzen 3. Art wird in dieser Studie nicht quantifiziert.

Das Entwicklungspotenzial liegt im Erschliessen von weiteren Anwendungen, in denen die genannten Vorteile zum Tragen kommen. Nachdem die bisher auf dem Markt angebotenen Produkte einer handwerklichen Fertigung entsprachen, geht in jüngster Zeit der Trend in Richtung Industrialisierung, beispielsweise automatische Beladung und Entladung. Die Notwendigkeit der Stützstrukturen kann durch bessere Leistungssteuerung im Aufschmelzprozess tendenziell reduziert werden, die nachgelagerte zerspanende Bearbeitung ist aus heutiger Sicht jedoch unumgänglich. Die Produktivität hat bereits eine Sättigung erreicht und kann nur noch graduell verbessert werden.



Beurteilungskriterien	--	-	~	+	++
Funktion					
Materialqualität					
Reaktionszeit					
Losgrösse					
Herstellkosten					
Gebundenes Kapital					
Dokumentationsaufwand					
Knowhow-Bedarf					

Abbildung 6: Relative Beurteilung von AM Pulverbett gegenüber der Bearbeitung eines vergleichbaren Werkstücks mit zerspanender Fertigung

In der relativen Beurteilung (Abbildung 6) stechen die Vorteile der Funktion, welche durch komplexe Formgebung stark gesteigert werden kann, der raschen Reaktionszeit und der Losgrösse 1 hervor. In Bezug auf die Materialqualität sind ebenbürtige Resultate möglich, jedoch mit einem höheren Dokumentationsaufwand, da die Materialqualität im Prozess entsteht. Die Fertigung ist teuer, das gebundene Kapital durch die wenig produktiven Anlagen und den Pulverkreislauf hoch, und schliesslich besteht ein hoher Knowhow-Bedarf bei der Konzeption und der Fertigung der Teile.

3.3 Prozesskette Eisenguss mit AM Formen

3.3.1 Einführung

Die Verwendung von Eisenguss als Rohling für eine zerspanende Verarbeitung ist klassischer Maschinenbau. Ein Gussrohling hat eine Formgenauigkeit im Millimeterbereich, was für die meisten Schnittstellen eine nachfolgende zerspanende Bearbeitung bedingt. Das Giessen von Eisenwerkstoffen ist bereits bei kleinen Serien wirtschaftlich vorteilhaft, solange die Endform nicht durch ein Halbzeug wie Blech oder Profile einfacher erzielt werden kann. Abgesehen von Einschränkungen bezüglich der minimalen Wandstärke besteht eine hohe Gestaltungsfreiheit, die komplexe Formen ohne grossen Mehraufwand als Near Net Shape ermöglicht.

Die Werkstoffeigenschaften können mit verschiedenen Massnahmen gegenüber traditionellem Grauguss verbessert werden, bleiben aber hinter hochwertigen Stählen zurück. Als Variante ist auch Stahlguss möglich, der jedoch aus verschiedenen Gründen auf ein kleines Anwendungsspektrum beschränkt bleibt.

Die flüssige Eisenschmelze wird in einer Sandform (Negativ) gegossen, welche zuvor mit einem Positivmodell, mit Sand und mittels eines Bindemittels bereitgestellt wurde. Da das Positiv keiner starken Beanspruchung ausgesetzt ist, kann es aus Holz oder Kunststoff relativ kostengünstig hergestellt werden. Neben dem eigentlichen Bauteil müssen in der Sandform Angiesskanäle vorgesehen werden, die etwa 1/3 der Rohmasse ausmachen und als Kreislaufmaterial nach dem Ausformen wieder eingeschmolzen werden. Als wesentliche Einschränkung resultiert, dass mit *einem* Modell nur konvexe Formen erzeugt werden können; ein Gussteil mit einer konkaven Form bedingt immer, dass das Modell zur Herstellung der Sandform aus mehreren Teilen zusammengesetzt ist, was das Verfahren kompliziert. Im typischen Fall einer kubischen Box besteht die Sandform aus einer Aussenform und einem Kern, welcher das Innere der Box freihält.



Rohteile aus Eisenguss sind unter starkem Preisdruck, und Kapazitätserhöhung bedingen hohe Investitionen. Giessereien in der Schweiz können nur bei hoher Auslastung preislich konkurrenzfähig sein. Dies führt bei fluktuierendem Bedarf gerade in konjunkturell guten Zeiten zu langen Lieferfristen, was diese Prozesskette für viele Anwendungen unattraktiv macht. Bei Erstaufträgen kommt zur logistisch- und auslastungsbedingten Lieferfrist die Zeit für die Herstellung des Modells hinzu. Eine kurze Lieferzeit zumal bei Erstaufträgen ist deshalb ein grosser Wettbewerbsvorteil.

Die Lagerung der Formen erfolgt in der Regel durch die Giesserei. Über Jahre und Jahrzehnte entstehen umfangreiche Formlager, welche zwecks Kundenbindung durch die Giesserei bereitgehalten werden.

Maschinen zum additiven Schichtaufbau mit Sand werden seit Jahren kommerziell angeboten. Der Sand wird schichtweise aufgetragen und in den Bereichen, in denen es erwünscht ist, durch einen Kleber selektiv verfestigt. Damit können Sandformen direkt, ohne vorgängige Bereitstellung eines Modells (Positiv) hergestellt werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass wesentlich komplexere Sandformen hergestellt werden können, die sonst mehrfach zusammengesetzte Modell benötigen würden oder überhaupt nicht möglich wären. Letztlich besteht nur die Bedingung, dass der nicht verfestigte Sand vor dem Giessen entfernt werden kann.

3.3.2 Prozesskette

Die traditionelle Prozesskette (Abbildung 7) besteht aus der Bereitstellung eines Modells (Positiv), welches zur Herstellung der Sandform benötigt wird. Nach dem Giessen, Ausformen und gegebenenfalls Nachbearbeitungen der Oberfläche entsteht das Fertigteil durch zerspanende Bearbeitung. Diese Prozesskette wird durch AM bei der Herstellung der Sandform verändert, alle weiteren Prozessschritte bleiben gleich.

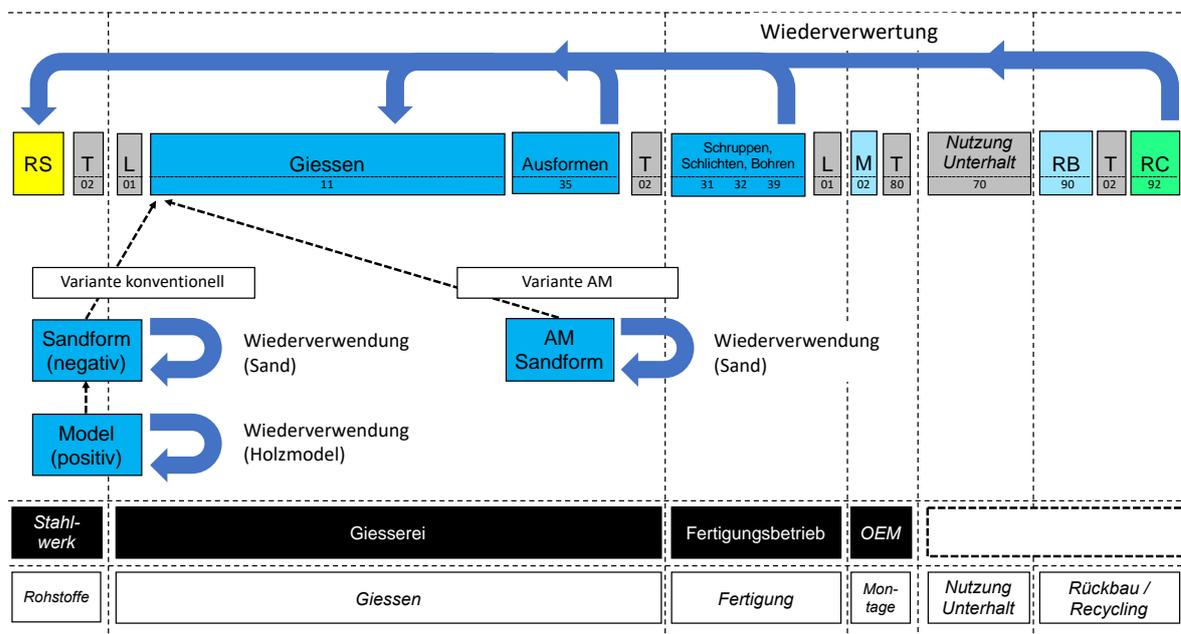


Abbildung 7: Prozesskette Eisenguss und zerspanende Fertigung, mit der Herstellung von Sandformen durch AM

3.3.3 Energiebetrachtung

Beim Giessen von Eisenwerkstoffen, Prozessschritt 11 in [Abbildung 8](#) fällt rund ein Drittel des Materials beim Ausformen als sog. Kreislaufmaterial für die Wiederverwertung in nachfolgenden Chargen an. Im Materialanteil fällt dies nicht als Verlust an, da keine Rückführung ins Stahlwerk erfolgt. Bei der



Berechnung der grauen Energie wird jedoch das Kreislaufmaterial als erhöhter Energiebedarf berücksichtigt.

Die Auslegung des Gussrohling erfolgt so, dass möglichst wenig Zerspanung notwendig ist. Typischerweise werden dabei z. B. Bohrungen durchgeführt und Auflageflächen eben gefräst. Der Materialverlust im Schritt 31, der Bearbeitung des Gussteils, ist deshalb geringer als bei der Zerspanung eines Standardhalbzeug, jedoch weiterhin relevant.

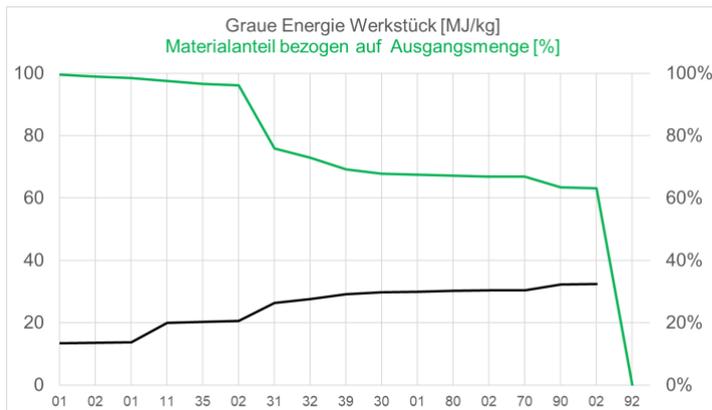


Abbildung 8: Eisenguss; Entwicklung der grauen Energie des Werkstücks und des Materialanteils bezogen auf die Ausgangsmenge

3.3.4 Entwicklungspotenzial

Die Herstellung von Sandformen für Eisenguss kombiniert mehrere Vorteile:

- kurze Lieferzeit für Erstaufträge durch Entfall des Modellbaus
- komplexere Formgebung
- geringer Aufwand für Modifikationen
- keine Lagerung der Form
- keine Veränderung der Prozesskette ab Auslieferung des Gussteils

Die kombinierten Vorteile sprechen für das Verfahren, wenn sich diese Vorteile zumindest teilweise auswirken. Als Nachteil stehen die höheren Kosten pro hergestellte Sandform entgegen. Aufgrund der Kosten kommt AM von Sandformen vor allem für die Formenkerne zur Anwendung; diese sind kleiner als die Aussenform und haben häufig eine komplexere Form. Die Aussenform wird mit einem einfach herzustellenden konventionellen Modell (Positiv aus Holz oder Kunststoff) erzeugt.

Bezüglich des Energiebedarfs sind keine grossen direkten Auswirkungen auszumachen, da das energetisch dominante Giessen gleichbleibt. Die grössere Gestaltungsfreiheit ermöglicht tendenziell eine Verringerung des Kreislaufmaterials und sie kann die nachfolgende zerspannende Fertigung verringern, nicht jedoch ersetzen. Im Weiteren können komplexere Teile gefertigt werden, die ihrerseits in der Anwendung eine höhere Effizienz oder andere verbesserte Eigenschaften haben. Dieser Nutzen 3. Art bleibt in dieser Studie ausser Acht.

Eisengussteile werden durch den globalen Wettbewerb sehr kostengünstig angeboten. Für technisch stabilisierte Volumen Anwendungen mit planbarem Bedarf ist ein Schweizer Lieferant in einer aussichtslosen Situation. Nur wenn sehr hochwertige, d. h. komplexe Formen kurzfristig auch bei einem Erstauftrag geliefert werden können, ist die Konkurrenzfähigkeit gegeben. Hinzu kommt die vereinfachte Möglichkeit, Änderungen vorzunehmen, die bei Erstserien häufig vorkommen.



Die höheren Stückkosten können zur Folge haben, dass nach den Erstserien, die unter hohem Zeitdruck hergestellt wurden, der Kunde aus Kostengründen den Anbieter wechselt. Das Geschäftsmodell der Giesserei verändert sich dahingehend, dass die Flexibilität ausschlaggebend und wertschöpfend wird.

Beurteilungskriterien	--	-	~	+	++
Funktion					
Materialqualität					
Reaktionszeit					
Losgrösse					
Herstellkosten					
Gebundenes Kapital					
Dokumentationsaufwand					
Knowhow-Bedarf					

Abbildung 9: Relative Beurteilung der Prozesskette Eisenguss mit AM Formen im Vergleich zu Guss mit konventioneller Sandformherstellung

Obschon hier AM nur eine Hilfsfunktion bei der Formenherstellung einnimmt, schlagen dessen Vorteil in Bezug auf die Funktion die Reaktionszeit und die Losgrösse durch, ebenso leider ein Kostennachteil und höhere Investitionen für die Anlagen zur AM Fertigung, siehe [Abbildung 9](#). Die Dokumentation kann hingegen besser automatisiert werden, und der Knowhow-Bedarf ist nicht relevant grösser, was durch den AM Prozess hinzukommt, fällt bei der Herstellung von komplexen Formen mit konventionellen Verfahren weg. Die relative Bewertung fällt insgesamt sehr günstig aus, was vor allem damit zu erklären ist, dass lediglich für den Giesser Umstellungen notwendig sind, während für dessen Kunden und andere Beteiligte nur Vorteile resultieren, bei bezifferbaren Mehrkosten, welche einfach abgewogen werden können.

3.4 Prozesskette Hybridfertigung mit Zerspanung

3.4.1 Einführung

Hybride Fertigung ist ein Sammelbegriff für eine Vielzahl von Kombinationen verschiedener Fertigungsverfahren. In dieser Studie wird der Begriff eingengt auf die Kombination von additiven und zerspanenden, also subtraktiven Fertigungsverfahren unter Verwendung eines Rohlings. Im Gegensatz zur Prozesskette AM Pulverbett, bei der das Teil vollständig durch Schichtauftrag hergestellt wird, wird bei der hybriden Fertigung von einem Rohling ausgegangen, der durch Schichtauftrag (Laser Metal Deposition LMD) verändert und anschliessend durch Zerspanung präzise verarbeitet wird. Im Gegensatz zu Beschichtungsverfahren, bei denen zum Beispiel eine Oberfläche verchromt wird, handelt es sich um einen Materialauftrag, der lokal gesteuert werden kann, was die Erzeugung von bestimmten Geometrien erlaubt.

Der besondere Reiz dieses Vorgehens liegt darin, dass damit sehr grosse Teile hocheffizient bearbeitet werden können, da der auch hier wenig produktive additive Auftrag nur punktuell erfolgt, und der grosse Grundkörper zum Beispiel durch Giessen effizient hergestellt wird. Darüber hinaus erlaubt dieses Vorgehen, additiv Material von besonderer Qualität aufzutragen, und dadurch besondere Eigenschaften wie zum Beispiel eine Oberfläche mit hoher Härte auf einem zähen, aber weniger harten Grundkörper zu erzeugen.



3.4.2 Prozesskette

Ausgangspunkt ist ein Halbzeug, auf dem lokal nach einem Abtrag durch Zerspanung zur Erzielung einer definierten Geometrie Material aufgetragen wird, um eine bestimmte Form und gegebenenfalls auch eine erhöhte Materialqualität an der Oberfläche zu erzeugen (Abbildung 10). Eine typische Anwendung sind Turbinenschaufeln aus einem gegossenen Rohling, bei denen an den stark beanspruchten Stellen zusätzliche Schichten mit erhöhter Materialqualität aufgetragen werden, die nachfolgend durch Zerspanung auf das tolerierte Mass gebracht werden. Am Lebensdauerende dieser Teile zeigt sich ein weiterer Nutzen der Hybridfertigung. Falls – wie im Fall einer Turbinenschaufel – der Verschleiss nur punktuell auftritt, kann der Grundkörper wiederverwendet werden. Die verschlissenen Stellen werden durch Zerspanung auf ein definiertes Mass gebracht, auf dem erneut ein additiver Materialaufbau und eine leichte Zerspannung erfolgt. Da systematisch nur die verschlissenen Stellen erneuert werden und die Qualität des aufgetragenen Materials höher ist als jene des Grundkörpers, resultiert für die Wiederverwendung sogar ein verbessertes Bauteil. Dieser Prozess kann mehrfach durchlaufen werden, bis der Grundkörper sein Lebensende erreicht hat. Als logistischer Vorteil kommt hinzu, dass die Beschaffung des Grundkörpers, welche Monate dauern kann, entfällt.

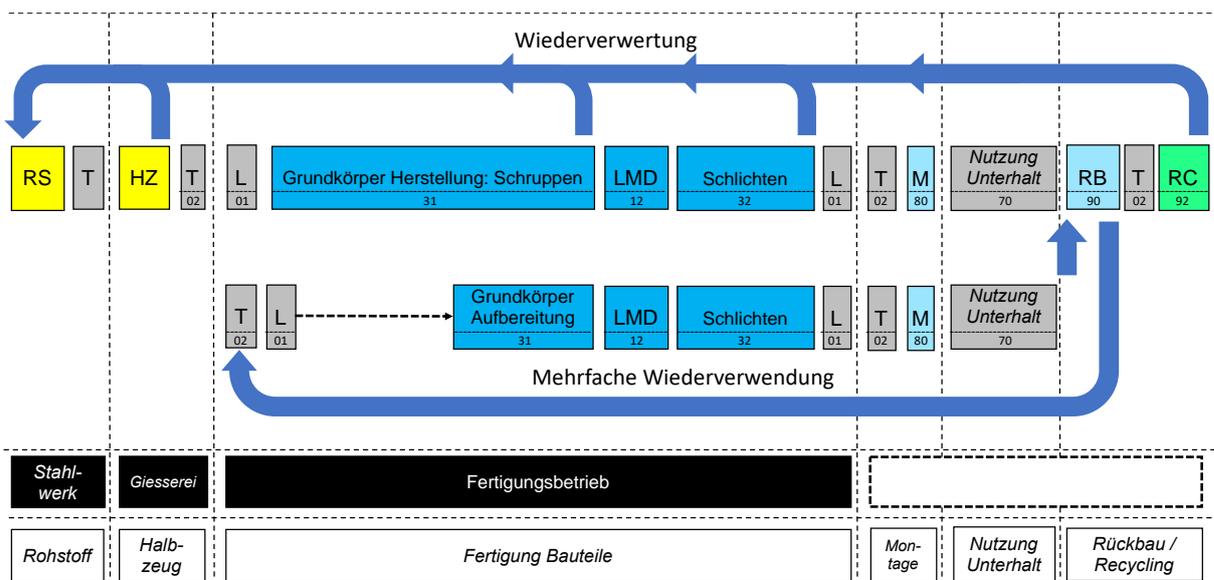


Abbildung 10: Prozesskette Hybridfertigung [LMD: Laser Metal Deposition]

3.4.3 Energiebetrachtung

Die Hybridfertigung ohne Wiederverwendung des Grundkörpers unterscheidet sich bezogen auf die Graue Energie und den Materialanteil im Werkstück (Abbildung 11) nur wenig von zerspanender Fertigung wie beispielsweise in 3.3 dargestellt. Der graduelle Unterschied des geringeren Energiebedarfs geht darauf zurück, dass hier der Grundkörper als Near Net Shape angenommen wird und der Zerspanungsanteil deshalb geringer ist.

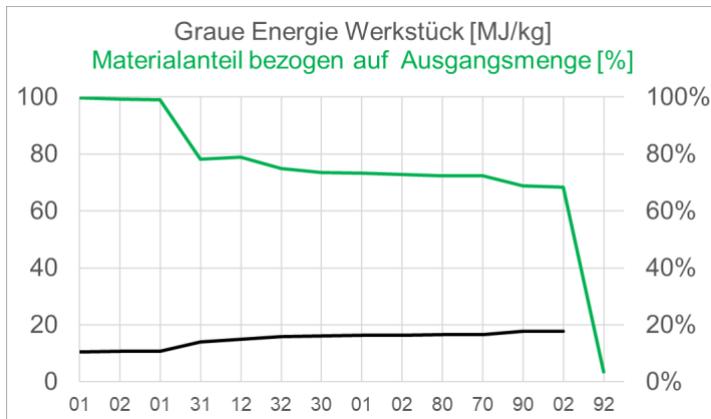


Abbildung 11: Hybridfertigung ohne Wiederverwendung; Entwicklung der grauen Energie des Werkstücks und des Materialanteils bezogen auf die Ausgangsmenge

Offenkundig werden die Vorteile hingegen bei der Wiederverwendung des Grundkörpers im Revisionsfall. Der Materialverlust und die Graue Energie werden minimal (Abbildung 12).

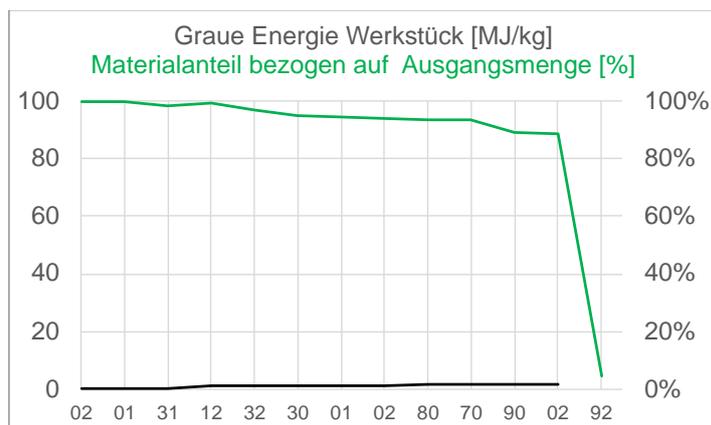


Abbildung 12: Hybridfertigung mit Wiederverwendung; Entwicklung der grauen Energie des Werkstücks und des Materialanteils bezogen auf die Ausgangsmenge

3.4.4 Entwicklungspotenzial

Hybride Fertigungsverfahren haben ein hohes Innovationspotenzial. Im erwähnten Beispiel der Turbinenschaufel Fertigung resp. Wiederverwendung akkumulieren sich mehrere Vorteile:

- starke Hebelwirkung der additiven Fertigung durch Veredelung eines effizient und kostengünstig hergestellten Grundkörpers, oder
- hohe Wertschöpfung durch Wiederverwendung eines kostenlosen und unmittelbar verfügbaren Grundkörpers
- Tendenzielle Qualitätsverbesserung des Bauteils in der Wiederverwendung

Die Einschätzung "Revidiert ist besser als neu" ist von vielen Baugruppen und auch von ganzen Maschinen bekannt. Die Besonderheit bei der dargelegten hybriden Prozesskette ist die Wiederverwendung auf Komponentenebene. Während bei einer klassischen Revision die Verschleissteile ersetzt werden, wird hier das Verschleissteil wiederverwendet.



Die spezifische Anwendung schränkt hybride Fertigungsverfahren ein. Die zuvor beschriebene Prozesskette ist mustergültig anwendbar und vorteilhaft für Turbinenschaufeln. Andere Anwendungen müssen aufwändig identifiziert und entwickelt werden. Von universeller Gültigkeit ist jedoch, dass die Additive Fertigung mit Pulver auf einem konventionell hergestellten Grundkörper die Stärken der Verfahren eindrücklich kombiniert. Dies gilt ganz besonders bezüglich Energieverbrauch, erst recht bei Wiederverwendung des Grundkörpers.

Das Entwicklungspotenzial ist erheblich. Einerseits ist zu erwarten, dass weitere Anwendungen durch hybride Verfahren erschlossen werden. Andererseits befinden sich Verfahren wie LMD noch in einer starken Entwicklung, vor allem auch, um die Anwendung zu vereinfachen, die Formgebung zu verfeinern und die Materialqualität auf hohem Niveau sicherzustellen.

Beurteilungskriterien	--	-	~	+	++
Funktion					
Materialqualität					
Reaktionszeit					
Losgrösse					
Herstellkosten					
Gebundenes Kapital					
Dokumentationsaufwand					
Knowhow-Bedarf					

Abbildung 13: Relative Beurteilung der Prozesskette Hybridfertigung mit Wiederverwendung des Grundkörpers gegenüber der Herstellung des gleichen Werkstücks ohne Wiederverwendung des Grundkörpers

Die relative Bewertung für den Fall der Wiederverwendung (**Abbildung 13**) lässt keine Zweifel an den Vorteilen hybrider Fertigung. Mit Ausnahme eines erhöhten Dokumentationsaufwands und eines Knowhow-Bedarfs, sind die Eigenschaften ebenbürtig oder vorteilhaft.

3.5 Prozesskette Décolletage von blankgezogenen Stangen

3.5.1 Einführung

Die Prozesskette «Décolletage von blankgezogenen Stangen» wird heute durch die Entwicklung von AM nicht relevant beeinflusst, trotzdem ist sie in dieser Studie von Interesse. Denn Drehen ab Stange oder Drahtspule, in der Schweiz bekannt als Décolletage, ist ein weitverbreitetes Fertigungsverfahren zur Herstellung von mehrheitlich rotationssymmetrischen Teilen, welche ursprünglich vor allem in der Uhrenindustrie verwendet wurden. Heute sind die Anwender vor allem aus der Elektro- und Elektronikindustrie, aus dem Maschinenbau, aus der Automobilindustrie und aus der Medizintechnik. Verarbeitet werden niedrig- und hochlegierte Stähle sowie Bundmetalle jeglicher Art. Etwas weniger als 10'000 Mitarbeitende sind im Bereich der «Runddreherei» (Werkzeugmaschinenbau und Produktion) in der Schweiz tätig. Früher wurden von den Kunden günstige Preise gefordert, heute vor allem kurze Lieferzeiten bei hohen Qualitätsansprüchen. Interessant im Kontext der Décolletageindustrie sind deshalb Verfahren und Werkstoffe, welche eine kurze Lieferzeit bei höchsten Qualitätsanforderungen sicherstellen. Dazu gehören eben auch neue Stahlsorten von Steeltec, welche blankgezogen, gut zerspan- und schweisbar sind und durch den Wegfall von Bearbeitungsschritten deutlich kürzere Lieferzeiten ermöglichen. Weil durch das Blankziehen auch die Festigkeit zunimmt, können leichte Teile realisiert werden.



Die Prozesskette Décolletage wurde also ausgewählt, weil sie eine bedeutende Prozesskette darstellt, in Bezug auf Menge und Wert an Material, die Anzahl der Mitarbeitenden in der Schweiz, der Exportorientierung, und weil sie mit neuen Stählen einen Innovationstreiber hat, der Kosten- und Zeitoptimierungen ermöglicht. Durch deren verbesserte Schweissbarkeit wird auch der Weg zur Kombination mit AM geebnet, der heute jedoch (noch) nicht genutzt wird.

3.5.2 Prozesskette und Entwicklungspotenzial

Das Rohmaterial stammt in der Schweiz aus der Weiterverwertung von Recyclingstahl durch Schmelzen im Elektroofen und Walzen. Im einfachsten Fall wird das gewalzte Stangenmaterial verarbeitet, siehe Abbildung 14, oberste Reihe, fortan Basisvariante genannt. Betrachtet wurde ein grösseres Décolletage-Teil von ca. 0.55 kg Endgewicht mit einem Zerspanungsanteil von 73%. Bei diesem Teil ist die zerspanende Bearbeitung alleine nicht genügend. Nach dem Schruppen folgt ein Härteprozess (*Anlassen*), Schlichtbearbeitungen, eine Wärmebehandlung und schliesslich ein Schleifen des durchgehärteten Materials.

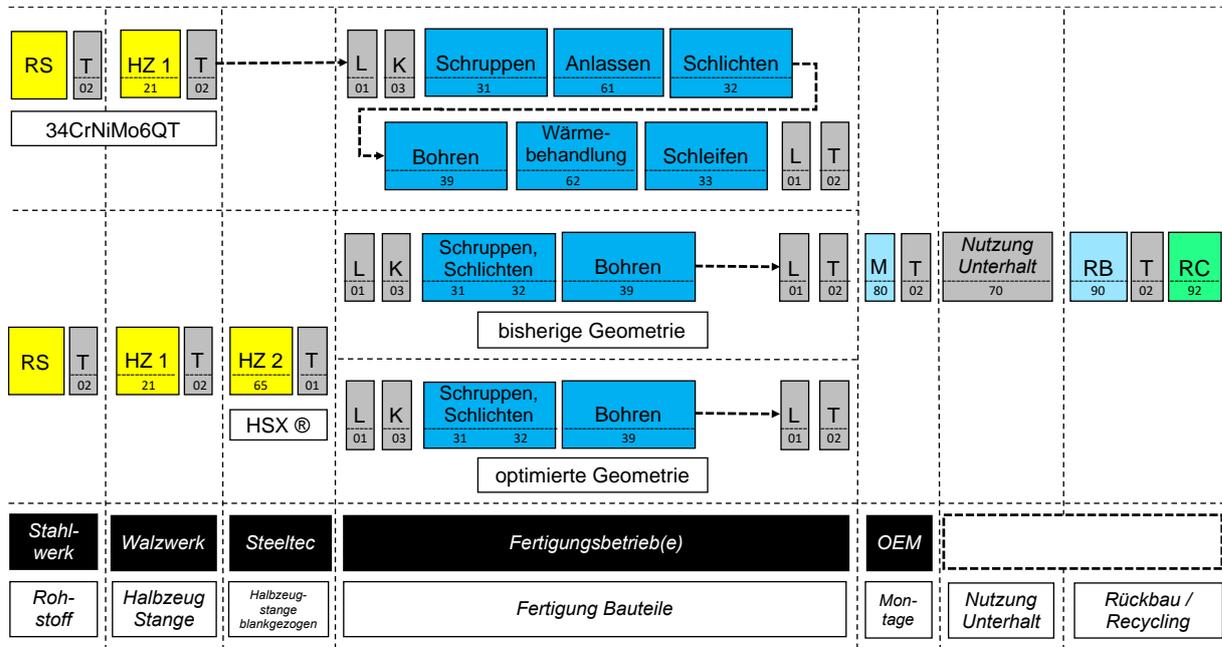


Abbildung 14: Prozesskette von gewalztem Stahl sowie blankgezogenem Stahl (und somit Wegfall von diversen Bearbeitungsschritten) mit bisheriger Geometrie und optimierter Geometrie (mit Ecodesign)

In Bezug auf den Energiebedarf sind Stahlschmelze und Blankziehen bereits weitgehend optimierte Prozesse. Bedeutend ist hingegen das Verbesserungspotenzial für die Materialeigenschaften des blankgezogenen Stahls, durch Veränderung der Legierungen und der Parameter der Blankziehprozesses. Diese Verbesserungen wirken sich in der Anwendung zum Beispiel durch geringeren Materialbedarf für gleichbleibende Leistung aus. Blankgezogene Stähle zeichnen sich insbesondere durch hohe Härte (bis 60 HRC), hohe Festigkeiten, gute Zerspanbarkeit sowie Schweissbarkeit (z.B. Kombination von harten und zähen Einzelteilen zu einem Teil mit kombinierten Eigenschaften) aus. Aktuelle Stahlsorten von Steeltec, z.B. HSX-Stähle, erfüllen diese Anforderungen in hohem Mass.

In der zerspanenden Verarbeitung sind die Möglichkeiten in Bezug auf die Energie weitgehend ausgeschöpft. Das Entwicklungspotenzial besteht darin, härteres und festeres Halbzeug in engeren Toleranzen und zu komplexeren Werkstücken zu verarbeiten, z.B. hybride Werkstücke aus zähem und



hartem Grundmaterial. Der Energiebedarf wird dadurch nur unwesentlich beeinflusst, während die Wertschöpfung signifikant erhöht wird.

3.5.3 Energiebetrachtung

In der Prozesskette der Ausgangsvariante ohne Blankziehen (Abbildung 15) ist der Materialverlust durch die Zerspanung und der einhergehende Anstieg der grauen Energie in Prozessschritt 31 dominant. Trotzdem nicht zu vernachlässigen sind die nachfolgenden Prozessschritte, die mit wenig Materialverlust, jedoch hohem Prozessenergieaufwand die graue Energie weiter ansteigen lassen.

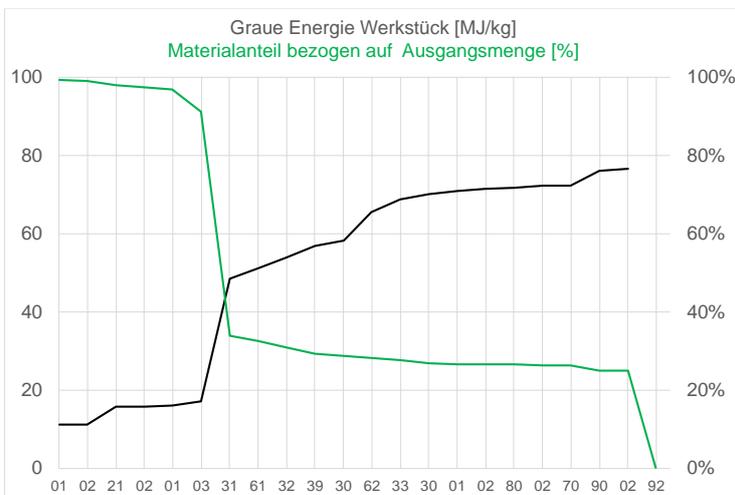


Abbildung 15: Prozesskette ohne Blankziehen und deshalb mit Wärmebehandlung

Dieser hohe Materialverlust durch die Zerspanung bleibt bei der Prozesskette mit Blankziehen, das selbst einen Materialverlust und in minderm Ausmass einen Energieaufwand verursacht (Prozessschritt 65 in Abbildung 16). Hinfällig sind hingegen das Härten und aufwändige nachfolgende Bearbeitungsprozesse, was insgesamt zu einer etwas tieferen grauen Energie führt.

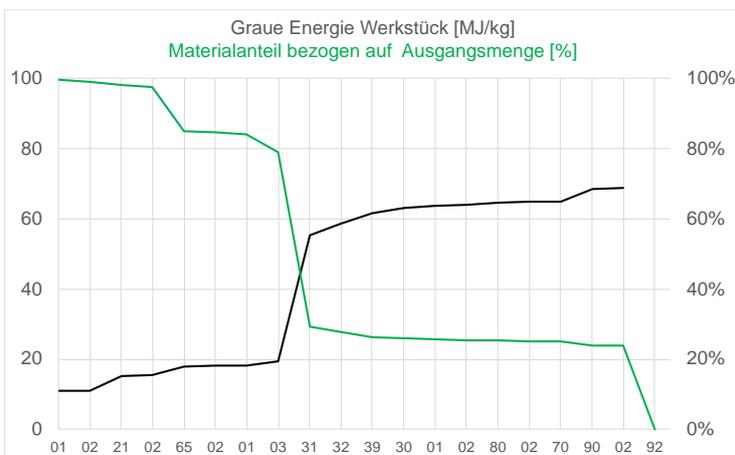


Abbildung 16: Prozesskette mit Blankziehen und deshalb ohne Wärmebehandlung

In der Darstellung der grauen Energie als spezifische Grösse (Abbildung 15, Abbildung 16), also massebezogen, kann die Verbesserung durch Geometrieoptimierung nicht zum Ausdruck gebracht werden. Bezogen auf die gleiche Funktion werden die Vorteile in Abbildung 17 offenkundig. Durch das



Blankziehen kann die Prozesskette verkürzt werden, der Energieaufwand geht jedoch nur geringfügig zurück. Eine signifikante Verbesserung kann durch Geometrieoptimierung erzielt werden, die durch die besseren Materialeigenschaften möglich wird.

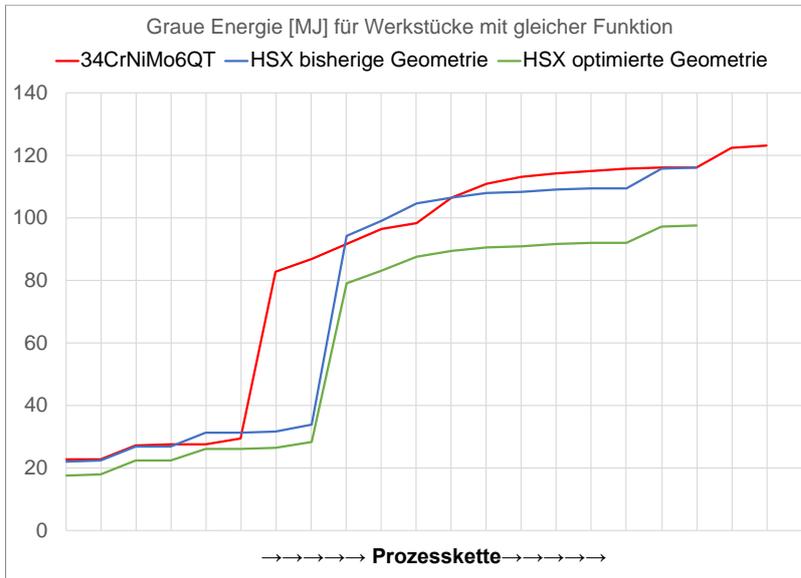


Abbildung 17: Graue Energie für Werkstücke mit gleicher Funktion, mit unterschiedlichen Prozessketten und mit Geometrieoptimierung. Da die Prozessschritte nicht übereinstimmen, sind sie nicht beschriftet.

Beurteilungskriterien	--	-	~	+	++
Funktion					
Materialqualität					
Reaktionszeit					
Losgrösse					
Herstellkosten				1)	2)
Gebundenes Kapital					
Dokumentationsaufwand					
Knowhow-Bedarf					
1) ohne geometrische Optimierung 2) mit geometrischer Optimierung					

Abbildung 18: Relative Beurteilung der Prozesskette Décolletage von blankgezogenen Stangen (ohne Wärmebehandlung) gegenüber der Basisvariante (mit Wärmebehandlung)

Die relative Beurteilung (Abbildung 18) zeigt, dass bei gesenkten Herstellkosten eine tendenziell bessere Materialqualität und ansonsten gleiche Eigenschaften erzielbar sind. Nachteilig ist lediglich der Knowhow-Bedarf seitens des Stahlherstellers resp. des Blankziehers, der im Markt eine gewünschte Einstiegsbarriere darstellt und Differenzierung ermöglicht.

3.5.4 Energiebetrachtung

HSX-Stähle haben eine hohe Härte, bis 55 HRC [8] und mehr, was einer Sackmesser Klinge entspricht. Dadurch entfällt, wie bereits erwähnt, eine allenfalls notwendige und energieaufwändige



Wärmebehandlung. Die blankgezogenen HSX-Stähle sind zudem gut schweisbar; damit werden neue Anwendungen möglich: es können Teile aus mehreren Grundkörpern mit ganz unterschiedlichen Materialeigenschaften verschweisst werden. Denkbar ist z.B. eine Welle aus zwei Grundkörpern: das eine Ende hat eine hohe Härte, weil es aus einem HSX-Stahl gefertigt wurde, das andere Ende ist zäh. Solche hybride Teile können heute nur sehr aufwändig hergestellt werden; zudem sind die hohen Anforderungen an Härte und weitere Eigenschaften eine grosse Herausforderung. Vor allem im Automobilbereich sind neue Anwendungen mit blankgezogenen Stählen denkbar und haben ein grosses Potential, wenn bessere, leichtere Teile günstiger und mit weniger Energieaufwand hergestellt werden sollen.

Eine Auswirkung von AM auf die klassischen Prozessketten der Décolletage ist heute nicht zu erkennen.

3.6 Prozesskette Blechverarbeitung

3.6.1 Einführung

Die blechverarbeitende Industrie in der Schweiz verarbeitet grosse Mengen. Nach Schätzung des Branchenverbandes und der Berichtsaufsteller (primär auf Basis von Import- und Exportstatistiken [3]) sind es rund 0.35 Mio. Tonnen Stahl pro Jahr. Bei der Blechverarbeitung fallen grosse Mengen an hochwertigem Neuschrott an, im Durchschnitt 20% des eingesetzten Materials. Dieser Neuschrott ist sehr begehrt bei Giessereien und Stahlwerk Swiss Steel, da er sortenrein und, entsprechende Massnahmen vorausgesetzt, gut dokumentiert bezüglich metallurgischer Zusammensetzung gezielt wiederverwertet werden kann. Zudem sind additive Verfahren wie Auftragsschweissen oder das Anschweissen von Gewindebolzen seit langem etablierte Prozesse in der Blechverarbeitung. Aus all diesen Gründen ist die Blechverarbeitung für diese Studie von Interesse.

In der Blechverarbeitung werden aus Stahlblech, einem hochwertigen und standardisierten Halbzeug, durch trennende Verfahren wie Stanzen, Plasma-, Laser- oder Wasserstrahlschneiden, einzelne plane Teile ausgeschnitten. Verfahrensbedingt fällt das nicht verwendete Material meist als zusammenhängendes Restgitter an. Je nach Anwendung werden die Teile durch Umformen zu 3D-Strukturen gebogen. Mit Blechverarbeitungsanlagen können hochproduktiv komplexe Geometrien hergestellt werden.

Bleche, ob plan oder zu komplexeren 3D-Strukturen gebogen, kommen in unterschiedlichsten Produkten zur Anwendung, beispielsweise:

- Mobiliar: Von Blechschränken für die Werkstatt, über Elektroschränke bis hin zu Designer-Möbeln
- Maschinen- und Anlagenbau: Verkleidungen, Hebel, Teile von Trägern und Verstrebungen
- Fahrzeuge: Karosseriebau, als Teil von Schweisskonstruktionen

Als trennendes Verfahren ist Laserschneiden vor allem bei einem heterogenen Teilespektrum und/oder bei komplexen Geometrien gut anwendbar und hoch produktiv. Zudem können unterschiedlichste Materialien verarbeitet werden, vom niedriglegierten Stahl über Edelstahl bis zu Aluminium, und dies mit derselben Anlage ohne Umrüsten.

Blechverarbeitung ist materialintensiv, was am Beispiel einer typischen Laser-Flachbett-Schneidanlage offensichtlich wird:

- 1'000 kg Blech werden pro Schicht verarbeitet; 20% davon sind Abschnitte (=Neuschrott).
- Bei einem 2-Schichtbetrieb werden auf der Anlage pro Jahr rund 500 t Blech verarbeitet, dabei fallen 100 Tonnen Neuschrott an.



- Der Energiebedarf der Anlage beträgt pro Jahr $3'500\text{h} \times 50\text{ kW} = 175'000\text{ kWh}$ (entspricht ca. $1'750'000\text{ MJ eq}$).
- Der Energiebedarf für die Materialbereitstellung beträgt $500'000\text{ kg} \times 10\text{ MJ eq [13]} = 5'000'000\text{ MJ eq}$, falls Recycling-Stahlblech, resp. $500'000\text{ kg} \times 35\text{ MJ eq [13]} = 17'500'000\text{ MJ eq}$, falls Neustahlblech

Die Betriebsenergie der Blechschneidanlage im Vergleich zur grauen Energie im Material beträgt in diesem Fall 10-40%. Aus energetischer Sicht ist deshalb das Hauptthema die graue Energie des Blechs, das zu 100% importiert wird.

3.6.2 Prozesskette

Bleche werden aus Neustahl oder Elektrostahl (aus dem Stahl-Recycling) hergestellt. Der Stahlhandel importiert entsprechende Bleche und beliefert die (Zuliefer-)Industrie in der Schweiz in verschiedenen Formaten, z. B. $1'500 \times 3'000 \times 2.5\text{mm}$.

Wegen der grossen Materialdurchsatzes ist die ökonomisch und ökologisch wertigkeitgerechte Wiederverwertung der Restbleche oder Restgitter ein fester Bestandteil der Prozesskette (Abbildung 19). Nach der eigentlichen Blechbearbeitung folgen weitere Bearbeitungsschritte, z.B. weitere Zerspanungsschritte (z.B. Schleifen der Oberflächen, Gewindeschneiden, ...), Biegen, Anbringen von Funktionselementen wie Gewindebolzen, und/oder Gefügeänderung (z.B. Härten) oder Beschichten (Farbauftrag). Im Anschluss an die Fertigung werden die Blechteile montiert und in Produkten genutzt. Am Lebensende wird das Produkt oder Teile davon einem Recyclingprozess zugeführt.

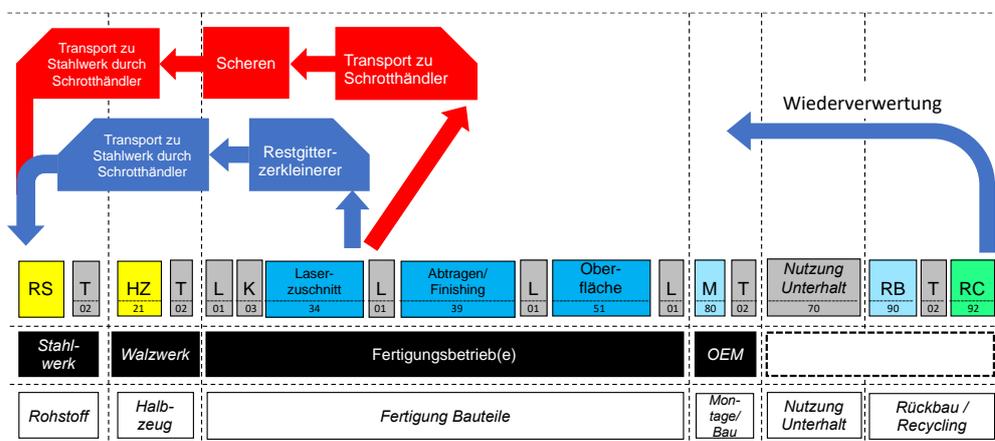


Abbildung 19: Prozesskette von Stahlblech: Aufarbeitung der Restgitter durch Schrotthändler (rot) oder direkt auf der Maschine (blau)

Für die Wiederverwertung gibt es grundsätzlich 2 Möglichkeiten (siehe Abbildung 19):

- a) Das Restgitter, welches beim Zulieferer entsteht, wird als Ganzes abtransportiert, vom Schrotthändler aufbereitet (Scheren) und ans Stahlwerk weitergegeben. Dies ist heute Standard in der Blechverarbeitung.
- b) Das Restgitter wird auf der Maschine direkt zerkleinert und ohne weitere Bearbeitung durch den Schrotthändler ans Stahlwerk geliefert. Die Vorteile sind: kurze Transportwege, ein Prozess fällt weg (beim Schrotthändler) und bessere Schrottqualität, falls die Logistik die sortenreine Wiederverwertung sicherstellt. Diese Möglichkeit ist eine realistische Entwicklung.



Durch Schachtelung der Teile können die Bleche optimal ausgenutzt werden. In der Praxis sind deshalb bei komplexeren Teilen eine Ausnutzung des Blechs bis zu 80% und mehr denkbar, teils schon Stand der Technik.

Der Neuschrott ist bei Giessereien oder in Stahlwerken (mit höheren Schrottanforderungen) sehr beliebt, nicht zuletzt, weil bessere Ergebnisse erzielt werden können. Schmelzversuche bei Swiss Steel (2018) bestätigen diese Aussagen [11].

3.6.3 Energiebetrachtung

Auffällig ist der grosse Verschnitt beim Zuschnitt des Blechs (Schritt 34 in [Abbildung 20](#)), welcher den grössten Materialverlust und zugleich Anstieg an grauer Energie ausmacht. Der Verschnitt variiert je nach Anwendung sehr stark, er kann auch deutlich höher sein als hier als mittlerer Wert angenommen. Charakteristisch ist jedoch, dass dies den einzigen grösseren Materialverlust darstellt, da die nachfolgenden Umformprozesse meist verlustlos sind. Eine Besonderheit tritt in Schritt 51 auf: Die Oberflächen von Werkstücken aus Blech werden häufig beschichtet, was die Materialmenge erhöht. Dabei handelt es sich zwar nur in Ausnahmefällen um eine Beschichtung aus Stahl, vereinfacht wurde jedoch diese Annahme getroffen, da für die Berechnung der Grauen Energie auf die Masse abgestellt wird.

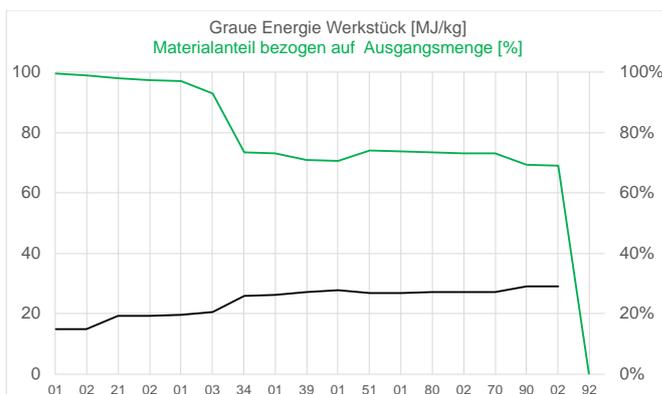


Abbildung 20: Blechverarbeitung; Entwicklung der grauen Energie des Werkstücks und des Materialanteils bezogen auf die Ausgangsmenge

3.6.4 Entwicklungspotenzial

Die direkte Prozessenergie für die Herstellung von einem typischen Blechteil liegt bei 10-40% im Vergleich zur Grauenenergie der Bleche. Selbst auf einer Laserbearbeitungsmaschine, die im Vergleich zu einem Bohr-Fräszentrum eine hohe Durchschnittsleistung von ca. 50 kW aufweist, ist die Grauenenergie der Bleche höher.

Additive Verfahren in der Blechbearbeitung (als eine spezielle Art der Hybriden Fertigung) sind denkbar und kommen auch in gewissen Formen zur Anwendung. Ein typisches Beispiel ist das Anschweissen von Bolzen auf die Bleche. Eine Auswirkung von additiven Verfahren auf die Prozesskette an sich ist heute jedoch nicht zu erkennen.

Entwicklungspotenzial besteht klar auf der Materialseite, also auf der besseren Ausnutzung der Bleche (=weniger Materialinput) sowie auf der optimierten Schrottreyclingkette (=effizienteres Recycling des Neuschrotts).



Beurteilungskriterien	--	-	~	+	++
Funktion					
Materialqualität					
Reaktionszeit					
Losgrösse					
Herstellkosten					
Gebundenes Kapital					
Dokumentationsaufwand					
Knowhow-Bedarf					

Abbildung 21: Relative Beurteilung der Prozesskette Blechverarbeitung mit Restgitterzerkleinerung und direkter sortenreiner Rückführung ins Stahlwerk gegenüber dem vorherrschenden Stand der Technik mit Gitterzerkleinerung durch den Schrotthändler

Im relativen Vergleich der Prozesskette mit Restgitterzerkleinerung gegenüber dem vorherrschenden Stand der Technik mit Scheren des Abschnitts beim Stahlhändler resultiert ein Kostenvorteil durch den höherwertigen Schrott, mit dem Nachteil der Investition in den Restgitterzerkleinerer und einem erhöhter Dokumentationsaufwand für die sortenreine Rückführung ins Stahlwerk. Die finanziellen Vorteile sind heute noch zu wenig ausgeprägt, als dass mit der raschen Durchsetzung einer wertigkeitgerechteren Wiederverwertung durch den Markt gerechnet werden kann.

Eine Herausforderung im Bereich des effizienten Stahlrecyclings sind und bleiben *fähige* und *beherrschte* Prozesse, also die aktive Vermeidung von systematischen und nicht systematischen Fehlern, durch technische und organisatorische Massnahmen. Der hier erläuterte Restgitterzerkleinerer direkt auf der Blechbearbeitungsmaschine wäre nur *eine* von verschiedenen möglichen Massnahmen. Um die ökonomischen und energetischen Vorteile effizient zu nutzen, muss zwingend die Frage nach der Verteilung des Mehrwerts entlang der Prozesskette geklärt werden. Dazu laufen aktuell Projekte mit relevanten Playern in der Schweiz, nachdem schon in den letzten Jahren in Bezug auf eine bessere Materialausnutzung respektive effizientes Schrottreycling bereits mehrere Studien in Zusammenarbeit mit CH-Stahlwerken durchgeführt worden, teilweise finanziert durch die CH-Stahlwerke selbst, teilweise mit finanzieller Unterstützung durch das Bundesamt für Umwelt BAFU. Bereits gewonnene Erkenntnisse sind:

- Die Schrottqualität hat einen grossen Einfluss auf die technische Ausbringungsrate, Yield genannt, und einen etwas geringeren Einfluss auf den schrottabhängigen Energiebedarf [9]. Bei sortenreinen Schrottfractionen kann ein Yield von ca. 96% erwartet werden; dies betrifft Blechabschnitte (=Neuschrott) und Kupolschrott (=Neuschrott und Rückbau). Beim Shredderschrott ist der Yield etwas geringer, bei Scherenschrott wegen Vermischungsfahr respektive Vermischungen deutlich geringer. Bei KVA-Schrott ist er nur noch ca. 75%, es gehen also 25% des Materials «verloren». Der schrottabhängige Energiebedarf steigt mit Abnahme der Schrottqualität und wird im ungünstigsten Fall doppelt so gross wie bei sehr guter Schrottqualität [9].
- Aktives Vermeiden von Vermischungen entlang der Schrottsammelkette kann den Yield erhöhen. 1% höherer Yield bedeutet, dass bei ca. 1,5 Mio. Tonnen Schrott jährlich in der Schweiz ca. 15'000 Tonnen Stahl weniger «verloren» gehen. Im Sinne einer ausgeglichenen Gesamtbilanz muss dieser Verlust durch Neustahl ersetzt werden. Die Herstellung von Neustahl verursacht einen Energiebedarf von ca. 35 MJ eq. Auf Energie umgerechnet resultieren durch einen 1% höheren



Yield jährliche Energieeinsparungen durch den Wegfall der Produktion von Neustahl von insgesamt ca. 525 Mio. MJ eq.

- Der Energiebedarf respektive die CO₂-Emission können auch in der Sammelkette selbst durch effizienzsteigernde Massnahmen reduziert werden; das Potential beträgt ca. 12 kg CO₂ / Tonnen bei zugleich reduzierten Kosten [10]. Die Untersuchungen basierend auf Lean-Studien bei verschiedenen Recyclinghöfen.
- Im weiteren zeigen Schmelzversuche bei Swiss Steel [11], dass durch bessere Schrottsorten, d. h. sortenrein und mit verlässlicher Information zur metallurgischen Zusammensetzung, bessere Stähle hergestellt werden können. Die Toleranzen bei den Legierungsbestandteilen können besser eingehalten werden.

3.7 Prozesskette Stahlbau

3.7.1 Einführung

Im Stahlbau werden aus standardisiertem Halbzeug, das vorgängig konfektioniert und bearbeitet wurde, tragende Strukturen zusammengebaut. Diese kundenspezifischen Teile werden anschliessend lackiert, zur Baustelle transportiert und montiert. Diese Prozesskette ist schon alleine durch die grosse Menge von rund 0.25 Mio. t Trägern und Blechen, die verarbeitet werden, interessant. Am Ende der Lebensdauer steht entweder die Wiederverwertung im Stahlwerk, oder aber die aus energetischer Sicht interessante Wieder- oder Weiterverwendung. Durch gezielte Konstruktion von Stahlbauten und die Verwendung der richtigen Stahlsorten kann Anteil an grauer Energie von Gebäuden signifikant gesenkt werden; dies ist ein aktuelles Ziel innerhalb der Energiedebatte.

Die Halbzeuge wie Träger, Rohre, Stangen, Profile und Bleche werden zu einem Grossteil im Ausland produziert, vom Stahlhandel importiert und an die einzelnen Stahlbauer in der Schweiz geliefert. Der Stahlbau selbst ist mehrheitlich als Werkstattfertigung organisiert. Der Automatisierungsgrad ist – im Vergleich zum Ausland – eher gering.

Der Stahlhandel liefert aktuell nicht nur standardisierte Halbzeuge, sondern aus einer zentralen Vorfertigung z. B. auch vorkonfektionierte Träger. Dies hat den Vorteil, dass beim Stahlhandel die Halbzeuge beim Zuschneiden besser ausgenutzt werden. Dadurch entstehen weniger Reststücke und die unvermeidbaren Reste können besser aussortiert und dem Recyclingprozess gezielt zugeführt werden.

3.7.2 Prozesskette

Die Halbzeuge werden kundenspezifisch konfektioniert, zu einzelnen Bauteilen zusammengesetzt (durch Schraubverbindungen, Schweissen, etc.), in der Regel beschichtet, auf die Baustelle transportiert und dort zusammengesetzt (Abbildung 22).

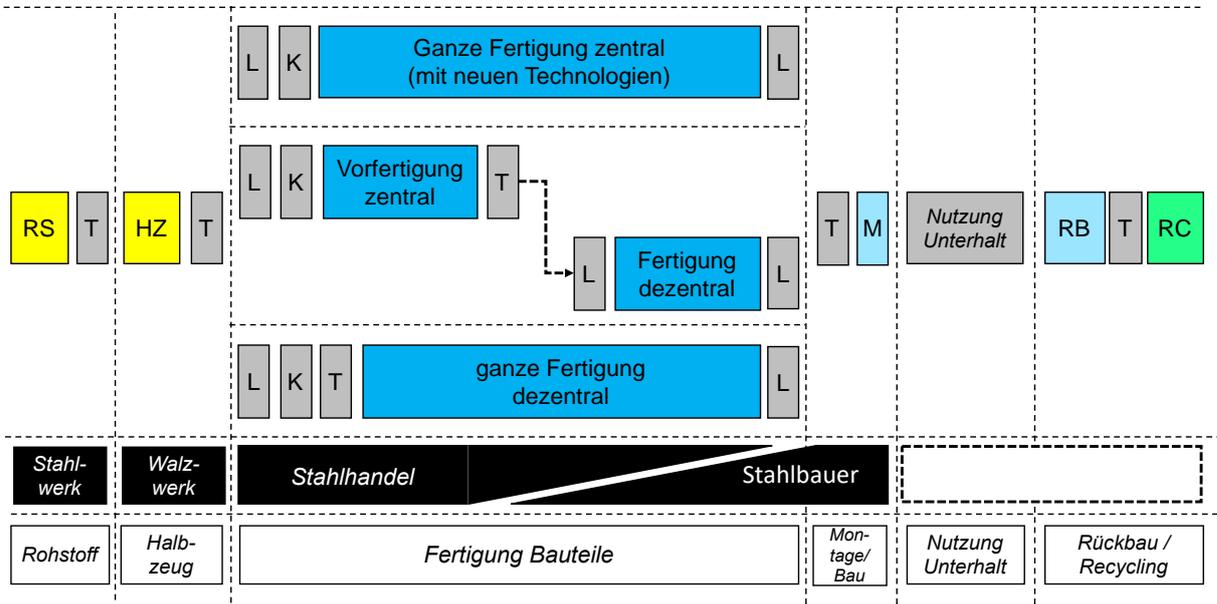


Abbildung 22: Prozesskette Stahlbau mit den Varianten zentrale Fertigung, zentrale Vorfertigung mit dezentraler Fertigung, und vollständig dezentrale Fertigung.

In **Abbildung 22** sind drei verschiedene Prozessketten bei Stahlbauern dargestellt:

- Die ganze Fertigung erfolgt dezentral (=Werkstattfertigung mit geringem Automatisierungsgrad)
- Vorfertigung zentral (beim Stahlhandel mit hohem Automatisierungsgrad) und Endfertigung beim Stahlbauer
- Ganze Fertigung zentral (industrielle Fertigung: flexibel, hoher Automatisierungsgrad, hohe Stückzahlen; Anlagenkapazität wird von vielen Stahlbauern geteilt)

3.7.3 Entwicklungspotenzial

Entwicklungspotenzial besteht im Hinblick auf eine industrielle Fertigung. Hier könnten neu automatisierte und effizientere Technologien genutzt werden.

Für den einzelnen Stahlbauer ist die Investition in eine industrielle Fertigung zu gross; es fehlt an den notwendigen Stückzahlen, um eine hochautomatisierte Anlage auszulasten. Die Herausforderung besteht deshalb in einer Kooperation von Stahlbauern, entweder mit finanzieller Beteiligung (z.B. als gemeinsame AG), oder dann durch Kooperationsverträge (z.B. mit festgelegten Kapazitäten) mit einem Investor (könnte der Stahlhandel sein oder ein grosser Stahlbauer). Beides braucht jedoch einen fundamentalen Wandel innerhalb der Branche.

Die direkte Wieder- und Weiterverwendung von Bauteilen und Baugruppen am Lebensende des Bauwerks haben eine sehr grosse Wirkung auf die graue Energie. Die MatCH-Studie [6] weist unter den Aspekten CO₂ und Umweltbelastungen (gemessen in UBP) signifikante Auswirkungen durch die Verwendung von Metallen in Bauten aus. Zum einen ist es die grosse Menge an Trägern und Blechen, welche jährlich in der Schweiz verbaut werden (ca. 0.25 Mio. Tonnen Stahl / Jahr). Zum anderen werden heute erst ca. 11% der Tragkonstruktionen direkt wiederverwendet; dies erfolgt primär durch Umbauten und Umnutzungen von bestehenden Stahlkonstruktionen oder Stahlhallen. Eine weiterführende Wiederverwendung von Bauteilen, von einzelnen Profilen, von Baugruppen oder sogar ganzer Stahlbauten, wie dies zum Teil im Ausland bereits der Fall ist, findet kaum statt. Die Gründe dafür sind unklar, denn das Rückbaumaterial ist in den meisten Fällen von gleicher Qualität wie Neumaterial,



ausser bei Ermüdung und plastischen Verformungen. Voraussetzung ist nur, dass es sich um die gleiche Stahlsorte handelt (alte Stahlsorten haben oft schlechtere Schweisseignung, andere Streckgrenzen etc.).

Eine signifikante Verbesserung der grauen Energie respektive des CO₂-Rucksacks im Stahlbau könnte erreicht werden. Die bisherigen Analysen und Studie innerhalb der Branche zeigen für Teilbereiche ein grosses Potential; dazu drei Beispiele:

- Wieder- und Weiterverwenden von Stahlbauten: im Rahmen von Sanierungen und Instandhaltungen werden bereits ca. 11% der Stahlbauten direkt weiterverwendet [12].
Hinweis: In [12] wurde ein Yield im Stahlwerk von nur 91% angenommen. Für Kupolschrott aus Stahlbauten, welcher relativ einfach und zugleich sortenrein rückgebaut werden kann, ist dieser Wert zu tief. Dieser wird in der Praxis um bis zu 5 Prozentpunkte höher liegen. Bei 0.25 Mio. Tonnen verbautem Stahl im Stahlbau in der Schweiz pro Jahr ist dies eine relevante Menge.
Ein systematischer Rückbau von Stahlbauelementen im Hinblick auf eine direkte Wiederverwendung verursacht zusätzliches Handling, Transporte und allenfalls Aufarbeitungen. Dieser Zusatzaufwand kostet. Es müssen deshalb Lösungen gefunden und umgesetzt werden, damit die relative geringe Preisspanne zwischen Schrottpreis und Neupreis besser im Hinblick auf eine direkte Wiederverwendung genutzt werden kann. Dies wird z.B. möglich durch *Ecodesign* von neuen Stahlbauten (Wiederverwendung ist Teil des Designs) oder durch effizientere Aufarbeitungsketten beim Rückbau.
- Im Stahlbau wird vielfach noch die (alte) Stahlsorte S235 verwendet. Die (neuere) Stahlsorte S355, die mit einem vergleichbaren Energieaufwand herstellbar ist, ermöglicht leichtere Konstruktionen. Mit einer Materialumstellung könnte so in der Schweiz jährlich ca. 14'500 Tonnen niedriglegierter Stahl eingespart werden. Dazu gibt es eine interne Studie, durchgeführt 2018.
- Logistik: Rund 0.25 Mio. Tonnen von Trägern und Blechen müssen in die Schweiz transportiert, beim Stahlhändler oder ab Zentrallager kommissioniert und zum Kunden transportiert werden. Von hier aus erfolgt dann der Transport zu den Baustellen. Hier besteht ein relevantes Verbesserungspotential, das aktuell in einer Studie, die durch den Vorstand des SSHV initiiert wurde, untersucht wird.

Die bisher durchgeführten Analysen und Studien zeigen ein relevantes Energieeinsparpotential in der Stahlbaubranche Schweiz; u.a. könnte so der hohe Anteil an grauer Energie in Gebäuden signifikant reduziert werden. Dazu braucht es jedoch zunächst eine Art *Energie-Masterplan* für die Stahlbau-Branche, welcher die Potentiale insgesamt wie auch eine erfolversprechende *Roadmap* aufzeigt. Zudem müsste geklärt werden, welche Synergieeffekte zu bereits bestehenden Förderprogrammen (insbesondere innerhalb des BfE's) genutzt werden können respektive müssten.

Zusammengefasst könnte der Energiebedarf durch folgende Massnahmen reduziert werden:

- Leichtbau (neue Materialsorten)
- Durch effizientere Technologien bei einer industriellen Fertigung: Schnellere, bessere, durch höhere Stückzahlen (Skaleneffekt) günstigere und wegen effizienter Technologien auch umweltgerechtere Herstellung, inkl. Logistik
- Bessere Ausnutzung der Halbzeuge, weniger Abschnitte und kleinere Reststücke.
- Optimierte Recyclingkanäle: Material sortenrein und wegen grösseren Mengen und voller Gebinde effizienter zum Stahlwerk transportieren.
- Wieder- und Weiterverwendung von Bauteilen und Baugruppen am Lebensende des Bauwerks.



4 Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen

Prozessketten in der Stahlverarbeitung verlaufen über mehrere Schritte mit zahlreichen Abhängigkeiten und Einschränkungen. Die Optimierung und/oder Substitution von einzelnen Schritten kann Nutzen erzeugen, hat aber eine Auswirkung auf vor- oder nachgelagerte Schritte, was insgesamt den Nutzen der Verbesserung bei einem Prozessschritt über die ganze Prozesskette relativieren oder verstärken kann. Bereits die wenigen ausgewählten Beispiele haben gezeigt, dass **immer die ganze Prozesskette betrachtet** werden muss, um die **Relevanz** der einzelnen Schritte und das **Entwicklungspotenzial** zu erkennen.

Das Konzept der grauen Energie ist tragfähig. Es zeigt die Relevanz der einzelnen Schritte in Bezug auf den Energieverbrauch auf. Bei der Bauteiloptimierung muss sie korrekterweise auf die Funktion bezogen werden, nicht auf die Masse, da die Wirkung von Geometrieoptimierungen sonst nicht ausgewiesen wird.

Die graue Energie des Werkstücks wird vor allem durch die **Effizienz der Materialverwendung** bestimmt. Selbst die energieintensivsten Fertigungsprozesse tragen weniger zur grauen Energie bei als die Materialverluste, die anfallen. Insofern liegen Umweltbilanzen seit jeher richtig, wenn sie vor allem oder gar ausschliesslich die Materialseite betrachten. Allerdings ist die **Materialmenge des Fertigteils zu wenig aussagekräftig**. Die Materialverluste in der Prozesskette müssen unbedingt berücksichtigt werden. Das Verhältnis zwischen Masse des fertigen Werkstücks und des notwendigen Rohteils variiert um Faktoren. Eine Energiebetrachtung ist in jedem Fall aussagekräftig, sofern sie den Materialverlust energetisch quantifiziert.

Neat Net Shape in der Urform, also dem Rohteil, ist deshalb der Schlüssel für eine effiziente Prozesskette. Giessen und Umformprozesse sind in dieser Hinsicht sehr effiziente Verfahren. AM im Pulverbett erfüllt die Ansprüche einer materialeffizienten Fertigung weniger als ausgewählte hybride Prozessketten, welche AM und Zerspanung geschickt kombinieren. Besonders glücklich ist die **direkte Wiederwendung von Rohlingen** durch Revision. Im gesamten Spektrum der Stahlverarbeitung sind dies zwar Sonderfälle. Die Vorteile sind jedoch so bestechend, dass sich eine gezielte Forschung in diese Richtung lohnt.

Aus wirtschaftlichen und auch aus prozesstechnischen Gründen hat der Einsatz von standardisiertem Halbzeug eine grosse Bedeutung in der Fertigung. Mangels Produktion in der Schweiz werden **grosse Mengen an Blech importiert**, die in vielen Anwendungen mit bedeutendem Verschnitt verarbeitet werden. Der Verschnitt kann durch bessere Softwareunterstützung in der Fertigungsplanung weiter reduziert werden. Vor allem aber kommt in diesen Fällen der umsichtigen, sortenreinen Wiederverwertung des Produktionsabfalls eine hohe Bedeutung zu. Die teils hohe Recyclinganteile haben ein eng verflochtenes Netz der Wieder- und Weiterverwertung geschaffen, innerhalb eines Unternehmens wie auch unternehmensübergreifend. Durch **sortenreine Wiederverwertung** kann dem Wertverlust des Schrotts entgegengewirkt werden. Dies hat keinen direkten Einfluss auf die Energieeffizienz im Recycling, wirkt sich aber durch verminderte Schlackenbildung, höherwertige Stahlsorten und vereinfachte Prozessführung stark auf die Wertschöpfung aus.

Im **Stahlbau** haben die **effiziente Verarbeitung** von Trägern und Blechen zu Tragkonstruktionen sowie die **direkte Wieder- und Weiterverwendung** von Bauteilen und Baugruppen am Lebensende des Bauwerks eine sehr grosse Wirkung auf die graue Energie. Es wird deshalb empfohlen, aufgrund der grossen Skaleneffekte, der hohen verbauten Stahlmengen und der in der Schweiz tiefen Rate der Wieder- und Weiterverwendung von Bauteilen in einem nächsten Schritt die Potentiale in der Branche an konkreten Beispielen zu untersuchen, zusammen mit grossen Stahlbauern, dem Stahlhandel, Rückbau- und Recycling-Unternehmen. Erfolgreiche Methoden und Lösungsansätze im Hinblick auf reduzierte graue Energie sollen aufgezeigt werden, ebenso die Ursachen für das aktuelle



Marktversagen ermittelt werden. Auf dieser Basis könnten **konkrete Massnahmen für die Branche** abgeleitet und der Kreislaufgedanke gestärkt werden.

Optimierungen von Werkstücken, die ihre Anwendung in aktiven und/oder mobilen Produkten finden, erzeugen unter Umständen **hohen Nutzen 3. Art**, also in der Anwendung. Ein erhöhter Energiebedarf in der Fertigung kann dadurch schon nach kurzer Nutzungszeit von Tagen oder Wochen wettgemacht werden. Nutzen 3. Art kann jedoch nur über eine **Funktionsbetrachtung im Einzelfall** bewertet werden. Da die Hebelwirkung sehr gross sein kann, lohnen sich solche Bewertungen in ausgewählten Fällen.



5 Referenzen

- [1] Giesserei-Verband der Schweiz GVS. Auf einen Blick - Zahlen und Fakten, Ausgabe 2016, Zürich.
- [2] Stahl Gerlafingen. <https://www.stahl-gerlafingen.com/de/Portrait>. Aufgerufen 2019-05-31
- [3] Schweizerischer Stahl- und Haustechnikhandelsverband SSHV https://www.sshv.ch/images/publikationen/handelsst%C3%A4hle/zollstatistik/Zollstatistik_Dezember_2018.pdf. Aufgerufen 2019-06-04
- [4] Stahl Gerlafingen. Wir setzen uns für eine nachhaltige Entwicklung ein. <https://www.stahl-gerlafingen.com/Portals/0/Content/de/pdf/willkommen/Urban%20Steel%20Mining.pdf>. Aufgerufen 2019-05-31
- [5] VDI 2243:2002-07. Recyclingorientierte Produktentwicklung. Technische Regel. 2002, Berlin.
- [6] Gauch M et al. Material- und Energieressourcen sowie Umweltauswirkungen der baulichen Infrastruktur der Schweiz. EMPA im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU. 2016, St. Gallen.
- [8] SN EN ISO 6508-1. Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Rockwell - Teil 1: Prüfverfahren (ISO 6508-1:2016)
- [9] Haupt M, Vadenbo C, Zeltner Ch, Hellweg St. Influence of Input-Scrap Quality on the Environmental Impact of Secondary Steel Production. Journal of Industrial Ecology, 2016
- [10] https://www.zuestengineering.ch/downloads/B10_Potentiale-in-Schrottsammelkette_2017.pdf. Aufgerufen 2019-07-01
- [11] https://www.zuestengineering.ch/downloads/B11_Benchmark-bestes-Schrottreycling_2018.pdf. Aufgerufen 2019-07-01
- [12] https://www.szs.ch/wp-content/uploads/2014/04/485-Bericht-EPD-Walzstahl-v8.0_mit-Unterschrift_AF_Vorversion.pdf. Aufgerufen 2019-07-02
- [13] VDI 4600. Kumulierter Energieaufwand – Beispiele. VDI-Fachbereich Umwelttechnik. 2015 <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4600-blatt-1-kumulierter-energieaufwand-beispiele>. Aufgerufen 2019-07-02
- [14] Bey N. The Oil Point Method - A tool for indicative environmental evaluation in material and process selection. 2000, ISBN 87-90855-09-4.
- [15] Züst R. Ressourceneffizienz ganzer Prozessketten. Schlussbericht Arbeitsgruppe im Auftrag des BAFU. Bern, 2015. https://www.zuestengineering.ch/downloads/B9_Ressourceneffizienz-ganzer-Prozessketten_2015.pdf. Aufgerufen 2019-07-02
- [16] Weber M, Züst R. Schneller, günstiger und umweltgerechter. Umweltperpektiven S. 8ff, 2013, Flawil.



- https://www.zuestengineering.ch/downloads/B13_Best-Practice-Guide_Energie-und-Materialeffizienz_2013.pdf. Aufgerufen 2019-07-02
- [17] Praxisbeispiel Nutzen 3. Art, Comet AG.
https://www.zuestengineering.ch/downloads/B4_Beispiel_ebeam_Comet_2016.pdf
. Aufgerufen 2019-07-02
- [18] Praxisbeispiel Nutzen 3. Art, Inficon Holding AG.
https://www.zuestengineering.ch/downloads/B6_Beispiel_effizienter-Sensor_Inficon_2016.pdf. Aufgerufen 2019-07-02
- [19] Praxisbeispiel Nutzen 3. Art, Steeltec.
https://www.zuestengineering.ch/downloads/B7_Beispiel_Leichtbau_Steeltec_2016.pdf. Aufgerufen 2019-07-02
- [20] Praxisbeispiel Nutzen 3. Art, HEWI.
https://www.zuestengineering.ch/downloads/B8_Beispiel_Leichtbaumutter-HEWI_2016.pdf. Aufgerufen 2019-07-02
- [21] Züst S, Züst R, Schudeleit T, Wegener K. Development and Application of an Eco-desgin Tool for Machine Tools. Proceedings of the 23rd Conference on Life Cycle Engineering, 2016, S. 431 – 336
- [22] Gontarz A, Hampf D, Weiss L, Wegener K. Resource Consumption Monitoring in Manufacturing Environments. 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Emerging Potentials 26: 264-269, 2015.
- [23] <https://www.ecotransit.org/calculation.de.html>. Aufgerufen 2019-04-16
- [24] Gutowski T, et al. Note on the Rate and Energy Efficiency Limits for Additive Manufacturing. Journal of Industrial Ecology 21(S1), 2017
- [25] Sakamoto Y et al. Estimation of energy consumption for each process in the Japanese steel industry: a process analysis. Energy Conversion and Management, Volume 40, Issue 11, 1999
- [26] Kemna R, et al. MEEUP Methodology Report. E. Commission. 2005, Brussels