



Energieeffizienz
weiter gedacht



The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that every sale, purchase, and payment must be properly documented to ensure the integrity of the financial statements. This includes recording the date, amount, and purpose of each transaction.

The second part of the document provides a detailed breakdown of the company's revenue. It shows the total revenue for each quarter and year, along with a comparison to the budgeted amounts. This analysis helps identify any variances and their potential causes.

The third part of the document details the company's expenses. It lists all major expense categories, such as salaries, rent, utilities, and marketing, and provides a comparison to the budgeted amounts. This analysis helps identify any variances and their potential causes.

The fourth part of the document discusses the company's profit margins. It shows the gross profit margin, operating profit margin, and net profit margin for each quarter and year. This analysis helps identify any trends and their potential causes.

The fifth part of the document provides a summary of the company's financial performance. It highlights the key findings from the previous sections and provides a final assessment of the company's overall financial health.

ETA – die Modell-Fabrik

Energieeffizienz weiter gedacht



Autoren:

Prof. Eberhard Abele
 Prof. Jens Schneider
 Martin Beck
 Andreas Maier

Die ETA-Fabrik – Vorbild für systemorientierte Konzepte

Das Thema Energieeffizienz in der Industrie nimmt künftig weiter an Bedeutung zu, da auch die Unternehmen in der Verantwortung stehen, ihrerseits einen Beitrag für den Klimaschutz zu leisten und sie andererseits wirtschaftlich gezwungen sind, die Produktionskosten zu minimieren. Der bewusste und nachhaltige Umgang mit der kostbaren Ressource Energie betrifft alle Sektoren des Wirtschaftens in unserer Gesellschaft, die heute mehr denn je als Gesamtsystem betrachtet werden müssen. Insofern gehört es zum Selbstverständnis von Ingenieuren, (energie-)effiziente Prozesse und Produktionsbetriebe zu entwickeln, die sich nachhaltig und umweltbewusst betreiben lassen.

Im Jahr 2011 startete das 6. Energieforschungsprogramm, das sich an den Zielen der Energiewende orientiert. In deren Fokus steht eine nachhaltige und sichere Energieversorgung, die auch wirtschaftlich umsetzbar ist. Der Schwerpunkt des Programms liegt auf systemorientierten Forschungsansätzen: einen solchen repräsentiert die ETA-Fabrik in ausgezeichneter Weise.

Bei dem Konzept steht die technologie- und disziplinübergreifende Kopplung von Lösungen im Fokus, um die Energieeffizienz im Gesamtsystem zu steigern. Die ETA-Fabrik ist ein Großdemonstrator für exzellente Einzel- und Verbundlösungen der unterschiedlichen Ingenieurdisziplinen. Vom Maschinenbau über Bauingenieurwesen und Architektur, Elektro- und Versorgungstechnik bis zur Kommunikationstechnik hat ein interdisziplinäres Team herausragende Innovationen identifiziert, praktisch umgesetzt und im Kontext einer industriellen Prozesskette und deren Gebäudehülle demonstriert.

Mit zahlreichen Seminaren und Vorträgen, Lehr- und Weiterbildungsveranstaltungen sowie vielen wissenschaftlichen Veröffentlichungen sensibilisieren die ETA-Fabrik und das Team der TU Darmstadt unabhängig und im universitären Kontext für die Möglichkeiten der Energieeffizienz in der Industrie. Rund 1.500 Besucher pro Jahr interessieren sich für die hier gezeigten technologischen Innovationen, die für Produktionsbetriebe ebenso wie für die Bauwirtschaft ein bedeutender Anstoß sind, um die Ziele der Energiewende zu erreichen. Hieraus gemeinsam entwickelte Ideen stärken den Wissenstransfer zwischen Forschung und Industrie, fördern gleichzeitig den Erkenntnisgewinn unserer Studierenden und motivieren junge Wissenschaftler, eigene Unternehmen zu gründen.

Die ETA-Fabrik zeigt, dass sich ein systemorientierter Ansatz lohnt und wir zukünftig mehr in die Technologien und in die Ausbildung zur Steigerung der Energieeffizienz investieren müssen. Diese Broschüre fasst die Forschungsergebnisse übersichtlich zusammen – für tiefere und detaillierte wissenschaftliche Einblicke in das System ETA-Fabrik ist ein Fachbuch geplant, das dieses besondere Forschungsprojekt würdigen und abschließen soll. ■

01 Das Projekt ETA-Fabrik strebt durch seinen integrativen Ansatz als erster Prototyp der Welt in eine neue Entwicklungsära für die energetisch optimierte Produktionsstätte der Zukunft. Vor dem Tor der ETA-Fabrik stehen die Projektleiter und zugleich Herausgeber dieser Broschüre: Andreas Maier, Prof. Jens Schneider, Prof. Eberhard Abele, Martin Beck (von links nach rechts).

© 2018

Alle Rechte vorbehalten

Herausgeber: Prof. Eberhard Abele, Prof. Jens Schneider,
Martin Beck, Andreas Maier
Redaktion: Claudia Siegele, Karlsruhe (www.frei04-publizistik.de)
Gestaltung: Björn Maser, Stuttgart (www.minimalist.cn)
Grafiken: Sandra Antes und Emily Broschk (PTW, TU Darmstadt)
Repro und Herstellung: Elke Weber, Stuttgart (www.ctrl-s.de)
Druck: Henkel GmbH Druckerei, Stuttgart (www.henkeldruck.de)
Papier: Munken Lynx
Printed in Germany
ISBN 978-3-00-059397-0

Gefördert durch:



Betreut von:



Unterstützt durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Ein Projekt der:



Bildnachweis:

Seite 2 Abb. 01, PTW Sibylle Scheibner; Seite 6 Abb. 01, HA Hessen Agentur GmbH - Jan Michael Hosan; Seite 7 Abb. 01, Eibe Sönnecken; Seite 7 Abb. 02, HA Hessen Agentur GmbH - Jan Michael Hosan; Seite 7 Abb. 03, Eibe Sönnecken; Seite 9 Abb. 01, DJA Architekten, Frankfurt; Seite 10 Abb. 02, DJA Architekten, Frankfurt; Seite 11 Abb. 03, Prof. Eisele und Dr.-Ing. Frank Lang, ehemals Entwerfen und Baugestaltung (EuB), Fachbereich Architektur, Tu Darmstadt; Seite 12 Abb. 01, HA Hessen Agentur GmbH - Jan Michael Hosan; Seite 12 Abb. 02, PTW; Seite 13 Abb. 03, EMAG Salach Maschinenfabrik GmbH / PTW; Seite 14 Abb. 04, PTW; Seite 15 Abb. 05, PTW; Seite 15 Abb. 06, Jan Michael Hosan; Seite 16 Abb. 07, PTW, Diss, Tilo Sielaff, Zum Einsatz von Synchronreluktanzmotoren in Motorspindeln für Universal-Bearbeitungszentren, Shaker-Verlag, Juli 2017, ISBN: 978-3-8440-5343-2 (MW); Seite 16 Abb. 08, HA Hessen Agentur GmbH - Jan Michael Hosan; Seite 17 Abb. 09, PTW; Seite 17 Abb. 10, Jan Michael Hosan; Seite 17 Abb. 11, Jan Michael Hosan; Seite 18 Abb. 12, MAFAC - E. Schwarz & Co. KG / PTW; Seite 18 Abb. 13, ZAE-Bayern / HA Hessen Agentur GmbH - Jan Michael Hosan; Seite 19 Abb. 14, Jan Michael Hosan; Seite 20 Abb. 15, IWT Bremen; Seite 21 Abb. 16, Jan Michael Hosan; Seite 22 Abb. 17, Jan Michael Hosan; Seite 22 Abb. 18, Jan Michael Hosan; Seite 23 Abb. 19, PTW; Seite 23 Abb. 20, Jan Michael Hosan; Seite 24 Abb. 01, PTW; Seite 25 Abb. 02, PTW; Seite 25 Abb. 03, HA Hessen Agentur GmbH - Jan Michael Hosan; Seite 26 Abb. 04, PTW / Eibe Sönnecken; Seite 27 Abb. 05, PTW; Seite 27 Abb. 06, MAFAC - E. Schwarz & Co. KG / PTW; Seite 28 Abb. 07, HA Hessen Agentur GmbH - Jan Michael Hosan; Seite 28 Abb. 08, PTW; Seite 29 Abb. 09, PTW; Seite 29 Abb. 10, Jan Michael Hosan; Seite 30 Abb. 11, Jan Michael Hosan; Seite 31 Abb. 12, PTW; Seite 32 Abb. 13, PTW; Seite 33 Abb. 14, Jan Michael Hosan; Seite 34 Abb. 15, PTW; Seite 35 Abb. 16, PTW; Seite 36 Abb. 17, IMS; Seite 36 Abb. 18, IMS; Seite 37 Abb. 19, IMS; Seite 38 Abb. 01, ISM+D / WiB; Seite 39 Abb. 02, Eibe Sönnecken; Seite 39 Abb. 03, ISM+D; Seite 40 Abb. 04, ISM+D / WiB; Seite 40 Abb. 05, ISM+D; Seite 41 Abb. 06, Eibe Sönnecken; Seite 41 Abb. 07, DJA Architekten, Frankfurt; Seite 42 Abb. 08, Alexander Wien; Seite 42 Abb. 09, Alexander Wien; Seite 43 Abb. 10, Eibe Sönnecken; Seite 43 Abb. 11, Eibe Sönnecken; Seite 44 Abb. 12, Eibe Sönnecken; Seite 44 Abb. 13, Eibe Sönnecken; Seite 45 Abb. 14, Eibe Sönnecken; Seite 45 Abb. 15, Eibe Sönnecken; Seite 46 Abb. 16, DJA Architekten, Frankfurt; Seite 46 Abb. 17, DJA Architekten, Frankfurt; Seite 46 Abb. 18, DJA Architekten, Frankfurt; Seite 47 Abb. 19, SINNBILD, Darmstadt; Seite 47 Abb. 20, Eibe Sönnecken; Seite 47 Abb. 21, Eibe Sönnecken; Seite 48 Abb. 22, Eibe Sönnecken; Seite 48 Abb. 23, ISM+D; Seite 49 Abb. 24, Eibe Sönnecken; Seite 49 Abb. 25, Eibe Sönnecken; Seite 50 Abb. 01, Jan Michael Hosan; Seite 51 Abb. 02, PTW; Seite 52 Abb. 03, PTW; Seite 53 Abb. 04, Jan Michael Hosan; Seite 53 Abb. 05, ISM+D; Seite 54 Abb. 06, PTW; Seite 55 Abb. 07, PTW; Seite 56 Abb. 08, Eibe Sönnecken; Seite 58 Abb. 01, Eibe Sönnecken; Seite 59 Abb. 02, PTW, HA Hessen Agentur GmbH - Jan Michael Hosan, Eibe Sönnecken; Seite 60 Abb. 01, PTW; Seite 60 Abb. 02, PTW; Seite 61 Abb. 03, Jan Michael Hosan; Seite 62 Abb. 04, PTW

Inhalt

Vorwort	3
1.0 Von der Theorie zum Konzept	8
1.1 Entstehung und Hintergrund	8
1.2 Innovationen – Leitidee und Konzept	11
2.0 Produktionsprozesskette	12
2.1 Energieeffiziente Zerspanung mit Werkzeugmaschinen	13
2.2 Energieeffiziente Bauteilreinigung	16
2.3 Energieeffiziente Wärmebehandlung	19
3.0 Energetische Vernetzung	24
3.1 Thermische Vernetzung	24
3.2 Energiedaten in der ETA-Fabrik	30
3.3 Energieflussregelung in der ETA-Fabrik	34
3.4 Kinetischer Energiespeicher	36
4.0 Innovative Schale, effizienter Kern	38
4.1 Die energieoptimierte Gebäudehülle als Bestandteil der Prozesskette	38
4.2 Energetische Integration von Lüftungsdecken und Glasfassaden in die ETA-Fabrik	42
4.3 Gestaltung	45
5.0 Die virtuelle energieeffiziente Fabrik	50
5.1 Informationsgewinn durch Simulation	51
5.2 Von der Komponente zum Fabrikssystem	52
ETA-Forum	59
Theorie und Praxis unter einem Dach	59
Factsheet	60





ETA – die Zukunftsfabrik

Drei Fachdisziplinen – eine Idee



1.0 Von der Theorie zum Konzept

1.1 Entstehung und Hintergrund

Energieeffizienz im produktionstechnischen Umfeld erfordert eine enge Zusammenarbeit von Ingenieuren verschiedener Fachdisziplinen. Ebenso wie bei Gebäuden steht auch im Maschinenbau die Effizienz im Fokus. Bei der Frage, wie sich eine zerspannende Werkzeugmaschine diesbezüglich optimieren lässt, kam die Idee auf, gemeinsam mit Bauingenieuren und Architekten die energetische Betrachtung nicht einzeln auf ein Produktionsgebäude oder auf Maschinen einer Produktionsprozesskette zu begrenzen, sondern das Produktionsgebäude gesamtheitlich als „Maschine um die Maschine“ zu begreifen. Dieser gedankliche Ansatz eröffnete zahlreiche neue wissenschaftliche Fragestellungen:

- Wie kann man auf Maschinenebene durch verbesserte Effizienz Abwärme vermeiden und unvermeidbare Abwärme effizient abführen?
- Wie lässt sich Abwärme im Rahmen einer thermischen Vernetzung optimal nutzen, und wie können elektrische Energiespeicher eingebunden werden, um den Lastgang zu beeinflussen?
- Wie können thermisch aktivierte Flächen der Gebäudehülle dazu beitragen, das Gebäude zu kühlen und zu beheizen sowie unterstützend oder maßgebend Kühlwasser bereitstellen?
- Welche Chancen eröffnet die Digitalisierung, die Effizienz in der Praxis zu steigern, die Energieflüsse optimal zu steuern und Produktionsbetriebe effizienter zu planen?

Im weiteren Verlauf des Projektes etablierte sich die interdisziplinäre Zusammenarbeit. Unter der Leitung von Prof. Abele (PTW) wurde gemeinsam mit den an der TU Darmstadt ansässigen Forschungsinstituten des Bauingenieurwesens Prof. Jens Schneider (ISM+D) und Prof. Harald Garrecht (ehemals WiB TU Darmstadt) und der Architektur Prof. Johann Eisele (ehemals EuB) das integrale Konzept für ein Produktionsgebäude entwickelt, das mit den darin ablaufenden produktionstechnischen Prozessen korrespondiert und vernetzt ist. Die komplexe Aufgabe der Gesamtintegration aller Beteiligten oblag Martin Beck, der die einzelnen Fachdisziplinen synergetisch zusammenführte.

Bereits in einer sehr frühen Konzeptphase wurde der Projektträger Jülich (PtJ) und somit das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) in das entstehende Forschungsvorhaben ein-

Autoren:

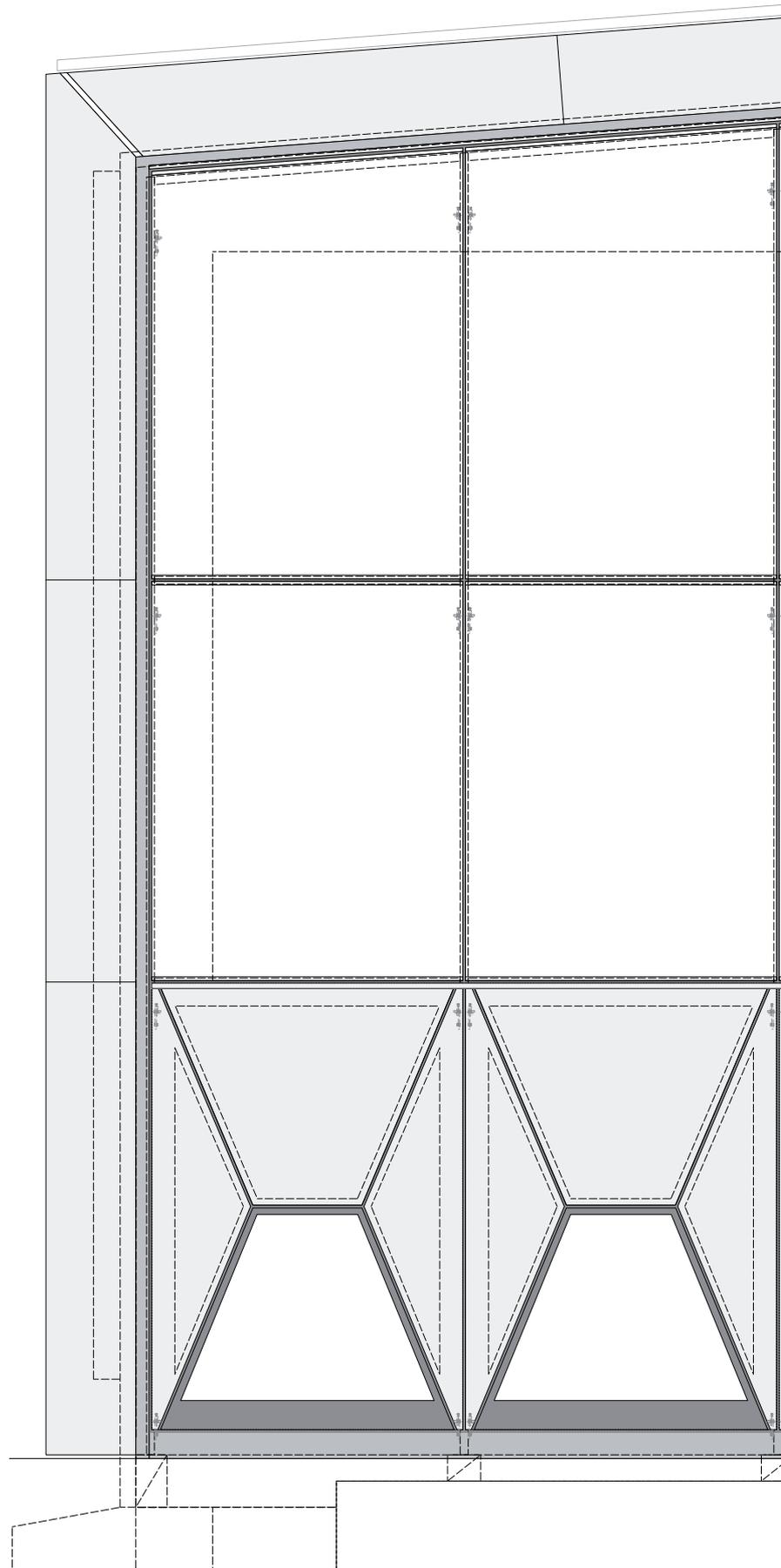
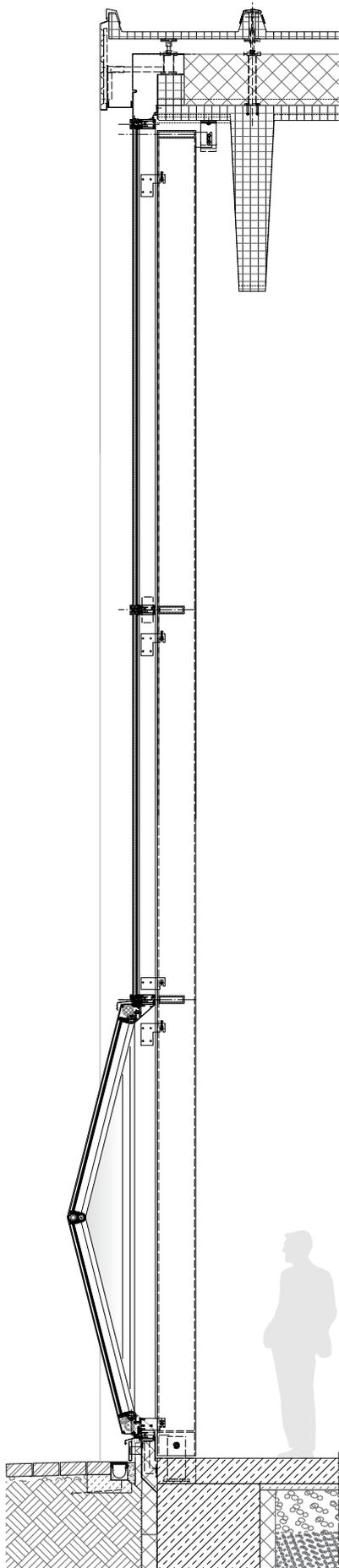
Prof. Eberhard Abele
PTW, TU Darmstadt

Prof. Jens Schneider
ISM+D, TU Darmstadt

Martin Beck
PTW, TU Darmstadt

Andreas Maier
ISM+D, TU Darmstadt

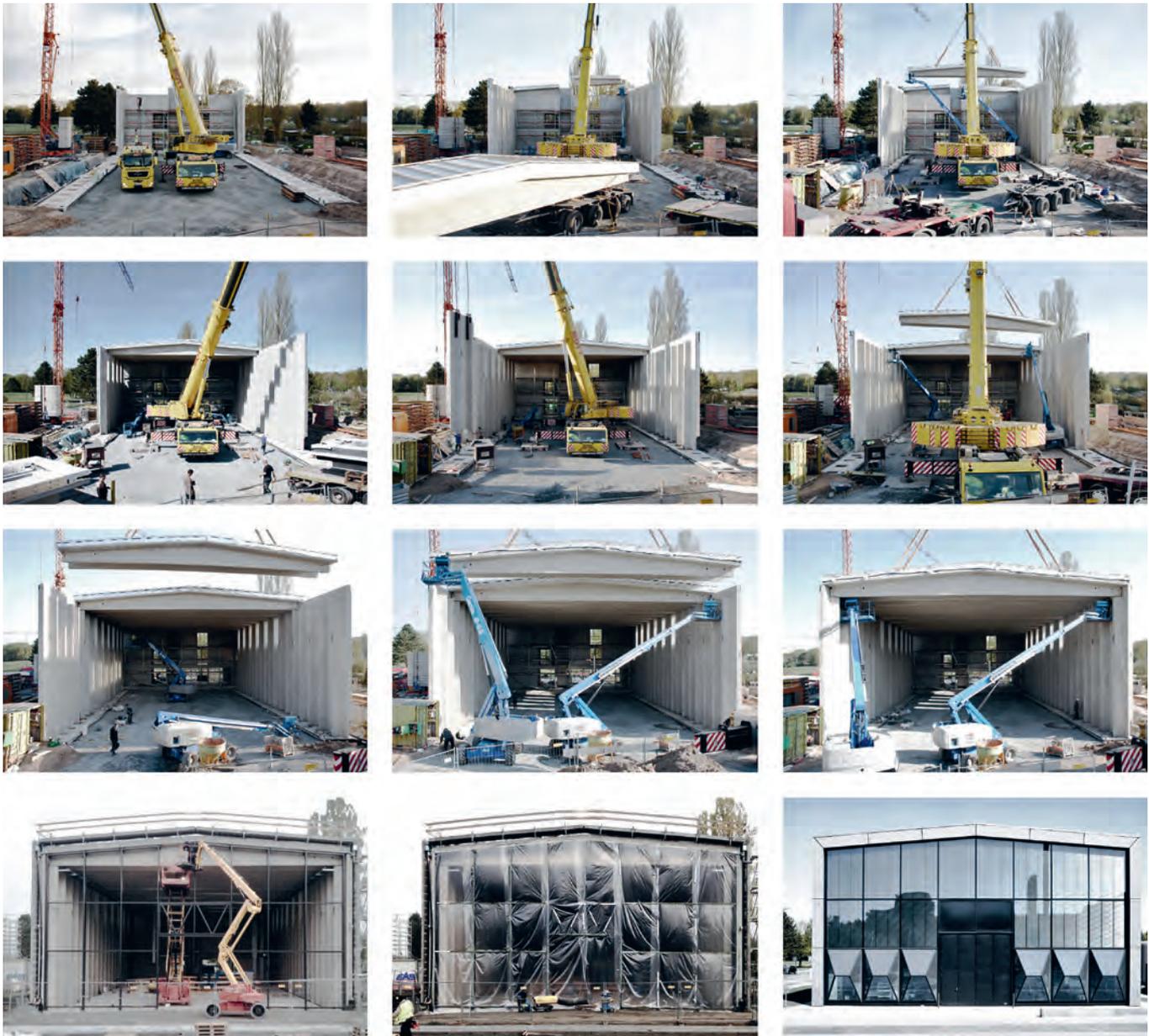
01 Schnitt und Ansicht der Südfassade mit den parametrischen Glaselementen.

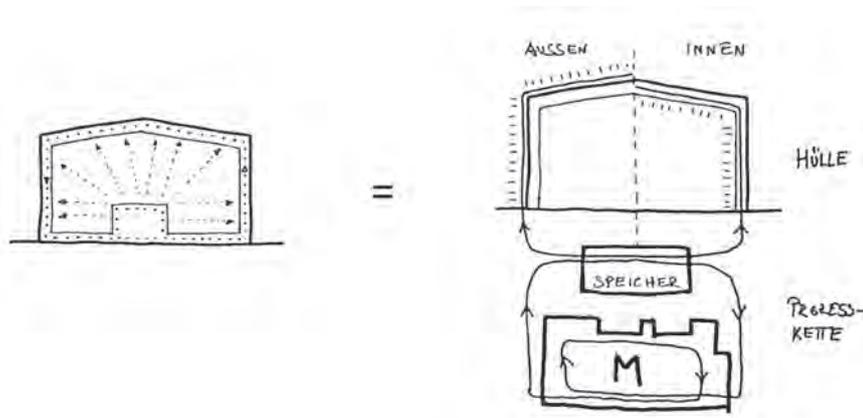


bezogen. Als erster Industriepartner konnte die Bosch Rexroth AG für das Vorhaben gewonnen werden. Durch die Beteiligung verschiedener Partner aus Industrie und Wissenschaft hatte sich bereits Anfang 2011 ein Konsortium aus 13 Projektpartnern herausgebildet. Die ETA-Fabrik war geboren. Die anlagenseitige Umsetzung erfolgte dann unter der Führung des PTW, bauseits leiteten das ISM+D, Dezernat V der TU Darmstadt und Dietz-Joppien Architekten, Frankfurt, das Projekt.

02 Montageablauf des Hallen-
traktes vom Betonieren der
Fundamente bis zur Fertigstellung.

Das Forschungsgrößgerät ETA-Fabrik steht so für die energetische Systemoptimierung durch Verschieben der Systemgrenzen zwischen Maschinen und Gebäude. Durch diesen Ansatz konnten marktfähige, wirtschaftlich realisierbare Energieeinsparpotenziale von rund 40 Prozent gegenüber einer konventionellen Produktionsstätte aufgezeigt werden.





1.2 Innovationen – Leitidee und Konzept

Energieeffizienz in der Industrie weiter zu denken bedeutet, neue Wege zu beschreiten, um ein neues, ganzheitliches Verständnis von Energieeffizienz zu entwickeln. Entgegen einem rein dogmatischen Ansatz Energie zu „sparen“, geht es hier darum, das Energiesystem zu verstehen sowie energetische Abhängigkeiten zu erkennen.

Die Leitidee und die hieraus abgeleiteten Konzepte der ETA-Fabrik zielen darauf ab, die richtige Energieform (Primärenergiebedarf) in der notwendigen Menge (Endenergiebedarf) zur richtigen Zeit (energieflexibel) am richtigen Ort (effiziente Infrastruktur) einzusetzen. Gleichzeitig werden Überkapazitäten in der Infrastruktur (Erzeugung, Verteilung, Speicherung, Wandlung) vermieden. Somit kann den komplexen und interagierenden Zielstellungen der Reduktion des Primärenergiebedarfs bzw. der CO₂-Emissionen, der Reduktion des Endenergiebedarfs sowie der Steigerung der Lastflexibilität begegnet werden. Die Systemeffizienz und die Wirtschaftlichkeit aller Maßnahmen stehen dabei im Vordergrund.

Das Grundgerüst der Forschungsarbeiten bildet eine beispielhafte Produktionsprozesskette aus dem Bereich der Metallbearbeitung. Durch die Verknüpfung der Produktionsprozesse, der Versorgungs- und Gebäudetechnik sowie des Gebäudes und seiner Konstruktion wird das Effizienzpotential des Gesamtsystems erforscht und demonstriert.

Das Projekt ETA-Fabrik strebt durch seinen integrativen Ansatz als erster Prototyp der Welt in eine neue Entwicklungsära für die energetisch optimierte Produktionsstätte der Zukunft. Dabei zielt der Fokus auf Einsparpotentiale in folgenden Bereichen sowie auf deren Zusammenspiel:

- Produktionsmaschinen und Querschnittstechnologien im Maschinenbau
- Technische Gebäudeausrüstung und Versorgungstechnik
- Gebäudehülle, Fassaden und Konstruktion
- Monitoring, Energiedatenmanagement und -mining durch „Industrie 4.0“-Ansätze
- Lastflexibilität und Regelungsoptimierung
- Simulationsansätze zum Planen und Betreiben effizienter Produktionsstätten

Über die Forschungszwecke hinaus wird die ETA-Fabrik als Ausbildungs- und Demonstrationszentrum genutzt. Sie dient damit der Forschung sowie dem Wissenstransfer an die Studierenden und in die Wirtschaft. ■

03 Erste Ideenskizzen einer thermisch vernetzten Fabrik.



01

2.0 Produktionsprozesskette

Damit sich die Ergebnisse des Forschungsprojektes auf möglichst viele Unternehmen übertragen lassen, wurde eine repräsentative Prozesskette für die metallverarbeitende Industrie ausgewählt. Die einzelnen Schritte (Drehen/Bohren/Fräsen, Reinigen, Wärmebehandeln, Schleifen, Reinigen) decken ein breites Spektrum der industriellen Fertigung ab (Abb. 01, 02), weshalb die Erkenntnisse insbesondere auch für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) relevant sind und auf deren Struktur übertragen werden können.



02 Für das ETA-Forschungsprojekt wurde stellvertretend eine typische Prozesskette der metallverarbeitenden Industrie ausgewählt, die auf viele Unternehmen übertragbar ist.

Die Prozessschritte dienen dazu, ein gemeinsam mit der Bosch Rexroth AG definiertes Demonstrationsbauteil herzustellen. Mit zwei Zerspanungsprozessen, zwei Reinigungsprozessen und einem Wärmebehandlungsprozess sind in der ETA-Fabrik Fertigungsmaschinen und -verfahren präsent, die in vielen Betrieben vertreten sind. Zudem decken die Demonstratormaschinen und die in den Maschinen enthaltenen Komponenten ein breites Spektrum von Querschnittstechnologien ab.

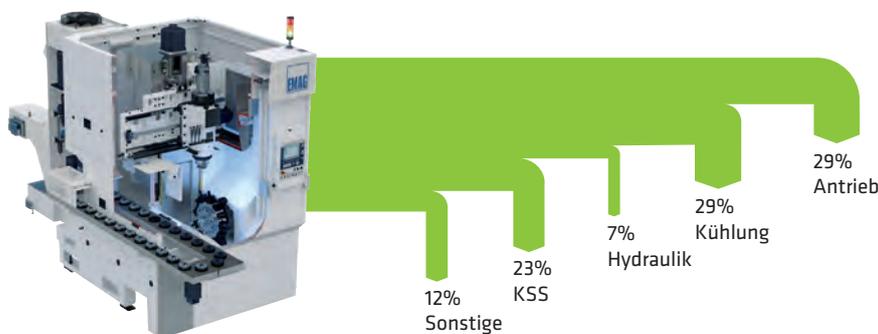
2.1 Energieeffiziente Zerspanung mit Werkzeugmaschinen

Kaum eine Produktionsmaschine ist hinsichtlich der Energieeffizienzpotenziale so intensiv erforscht wie die Werkzeugmaschine. Für die ETA-Fabrik bildet die Forschung an Werkzeugmaschinen am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) seit der Jahrtausendwende – und zuletzt im Projekt MaxiEM (Maximierung der Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen) – den Ausgangspunkt der Aktivitäten. Um vorhandene, bisher nicht identifizierte Potenziale offenzulegen, wurde in der ETA-Fabrik das Thema Energieeffizienz »weiter gedacht«. Die hier eingesetzten Maschinen (Bearbeitungszentrum, Vertikaldrehmaschine, Vertikalschleifmaschine) sind darauf ausgelegt, Energie einzusparen, ohne dass in den höchst individuellen anwendungsspezifischen Produktionsprozess eingegriffen werden muss. Dies gelingt durch etablierte und marktgängige Technologien der Projektpartner sowie Entwicklungen und Neuheiten, die kurzfristig Marktreife erlangen können.

In vorhergehenden Forschungsprojekten wurden bereits einige Erkenntnisse zur Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen erarbeitet. Im Fokus der ETA-Fabrik stehen das Kühlsystem und die Abwärmequellen der Maschinen. Größte Wärmequelle in den Maschinen mit einem Anteil von meist einem Fünftel der zugeführten Gesamtenergie ist die Motorspindel (Abb. 03).

2.1 Autoren:

Mark Helfert, Markus Weber
PTW, TU Darmstadt



03 Wirkleistungsbedarf einer Drehmaschine – größte Wärmequelle für die Abwärmenutzung sind Antrieb und Kühlung.

Ausgehend von dem bereits hohen Effizienzniveau der untersuchten Maschinen wurden im ETA-Projekt die folgenden Maßnahmen identifiziert, die einen Ansatz für Effizienzoptimierung bieten:

- drehzahlvariable Hydraulikaggregate,
- bedarfsgerechte Kühlschmierstoff (KSS)-Versorgung,
- Sperrluftreduzierung durch optimierte Labyrinthdichtungen,
- Energie- und ressourceneffiziente Antriebsalternativen,
- thermische Optimierung von Motorspindeln und
- optimiert geregelte Einspeiseeinrichtung für Antriebsverbände.

Abwärmerückgewinnung steigert den Maschinennutzungsgrad und senkt den Gebäudeenergiebedarf

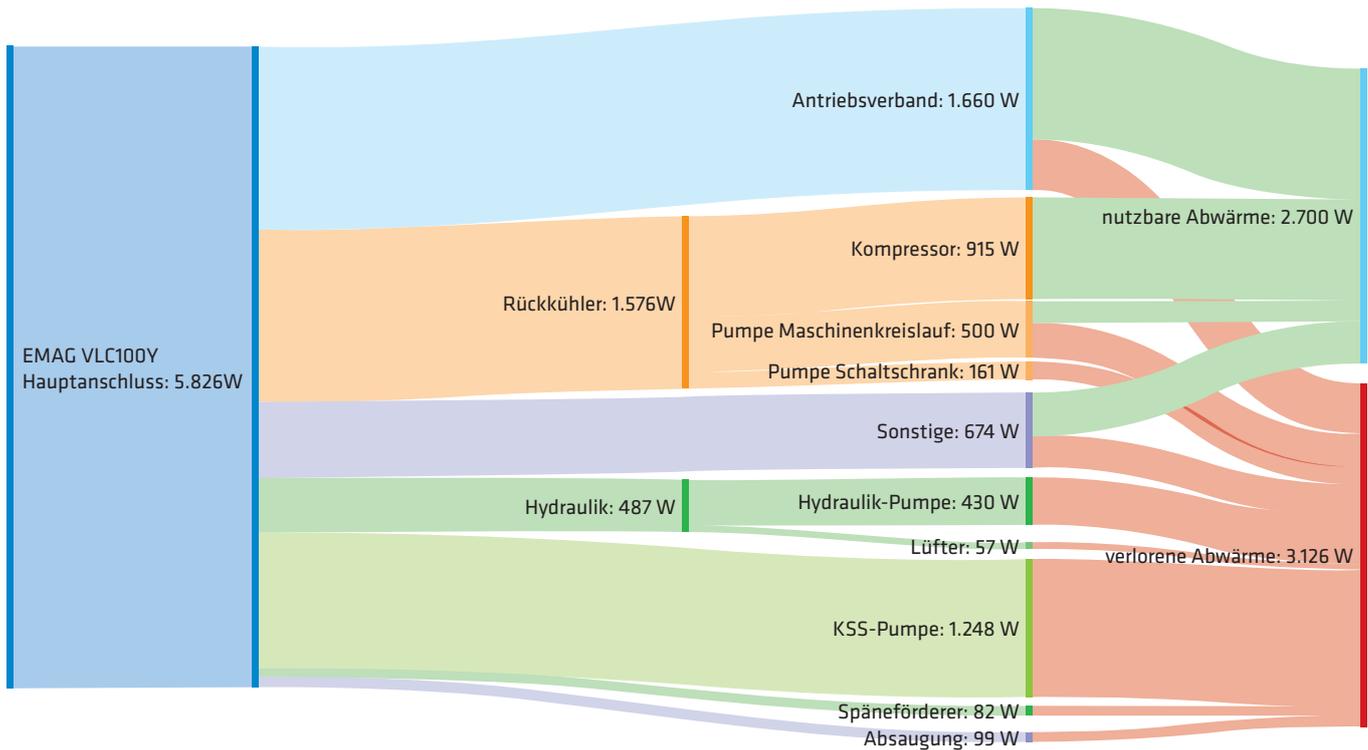
Im ersten Schritt ist es gelungen, die Einzelkomponenten der Maschinen zu optimieren und so deren Energiebedarf auf ein Minimum zu reduzieren – gegenüber der Referenzmaschine um ein Fünftel. Dies wurde unter anderem durch drehzahlvariable Hydraulikaggregate und eine bedarfsgerechte KSS-Versorgung erreicht. Das Implementieren eines Energiemonitorings und -controllings ermöglichte es, den Energiebedarf im betriebsbereiten Zustand deutlich zu reduzieren. Im zweiten Schritt stand die konsequente weitere Nutzung der unvermeidlich entstehenden Abwärme beim Betrieb der Maschinen im Fokus. Bei der Drehmaschine mit dezentraler Kühlung konnten über 40 Prozent der Abwärme flüssigkeitsgebunden abgeführt und anderen Prozessen zur Verfügung gestellt werden (Abb. 04).

Bei der Schleifmaschine wurde die dezentrale Kompressionskältemaschine durch ein von EMAG entwickeltes Wärmeaustauschmodul ersetzt. So konnten die Maschine und der Kühlschmierstoff effizienter über das zentrale Kältenetz der ETA-Fabrik gekühlt werden. Die flüchtige Wärmeabfuhr reduziert überdies den Wärmeeintrag in die Produktionshalle, was wiederum auf der Gebäudeseite den Energiebedarf zur Klimatisierung senkt.

04 Wirkleistungsbedarf der Vertikaldrehmaschine EMAG VLC100Y und Anteil der nutzbaren Abwärme.

Energieeffiziente Antriebe in Motorspindeln zur thermischen Optimierung

Ein Teil des Projektes beinhaltete das Auslegen, Entwickeln und Konstruieren mehrerer Demonstrator-Motorspindeln. Der Fokus lag auf zwei leistungs- und bau-



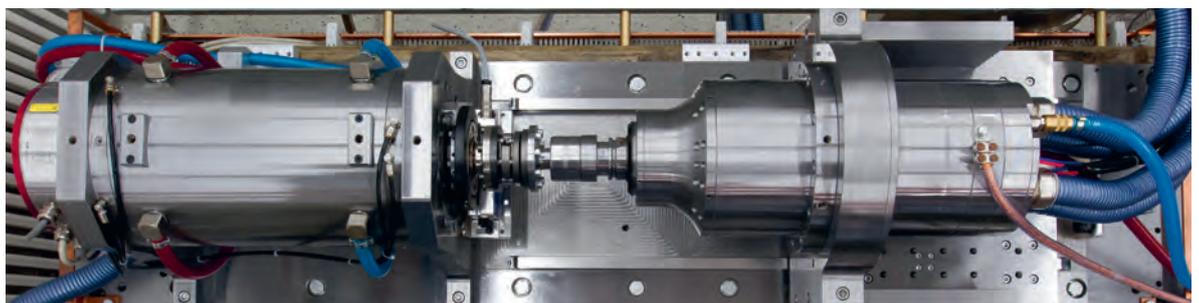


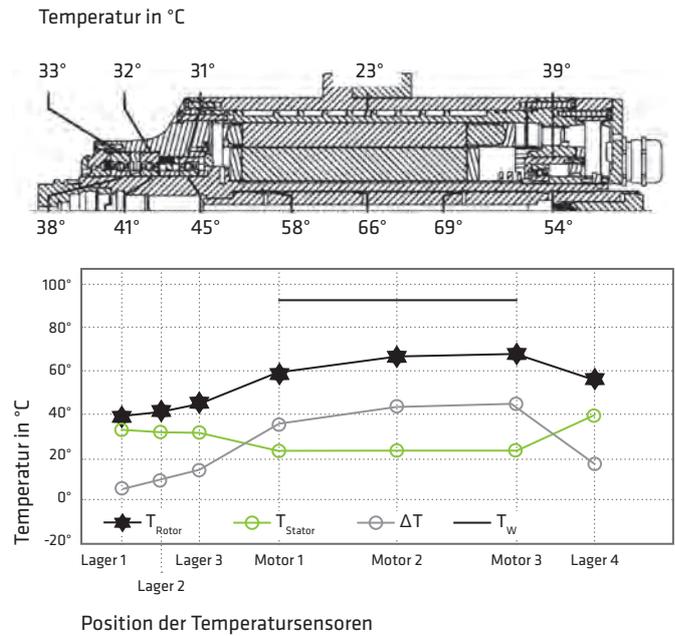
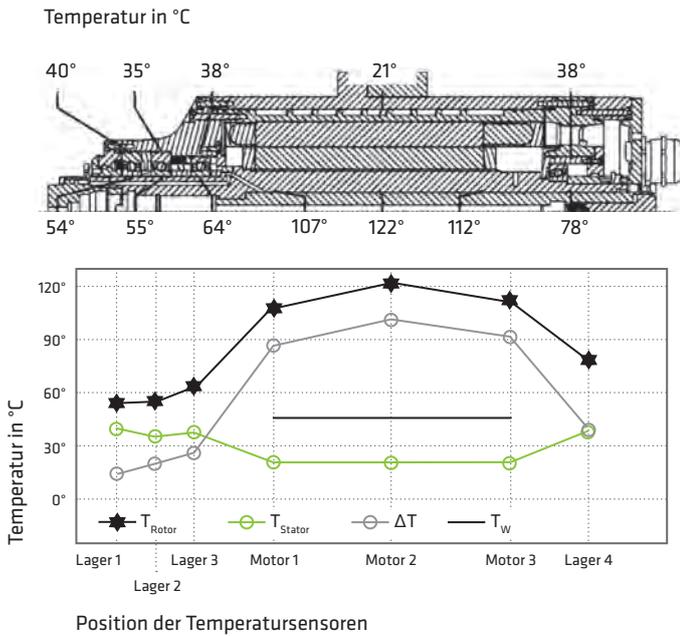
gleichen Motorspindeln mit unterschiedlichem elektrischen Antrieb: Synchronreluktanzantrieb (SynRM) im Vergleich zum Asynchronantrieb (ASM). Dazu wurden die Antriebe auf dem Prüfstand untersucht, um die Verluste und den Wirkungsgrad zu bestimmen sowie das thermische Verhalten zu analysieren (Abb. 06).

Da im SynRM die rotorseitigen Kupferverluste entfallen, sind dessen Verluste für alle Lastanforderungen nur etwa halb so groß wie die der ASM. Der Wirkungsgrad der SynRM ist in allen Betriebspunkten um etwa fünf Prozent höher. Selbst wenn man die Umrichterverluste mit einbezieht, kommt das gesamte SynRM-Antriebssystem insgesamt auf eine geringere Verlustleistung als die baugleiche ASM-Motorspindel.

05 Wärmetauschmodul der Vertikalschleifmaschine EMAG VLC100GT

06 Prüfstand am PTW mit SynRM-Prüfling und Lastmaschine





07 Stationäre Temperaturverteilung in der ASM (links) und der SynRM (rechts)

Zur thermischen Analyse der Antriebe wurden stationäre Temperaturverteilungen im Betriebspunkt mit maximalen Verlusten gemessen. Insgesamt weist die SynRM geringere Systemtemperaturen auf, und die Temperaturverteilung ist gleichmäßiger (Abb. 07). Dies wirkt sich positiv auf das thermische Verhalten des Spindelsystems aus. Die Verlagerung der Plananlage an der Werkzeugschnittstelle ist infolge einer wärmeinduzierten Dehnung der Spindelwelle mit SynRM halb so groß wie mit ASM, was ein besseres Zerspanungsergebnis hervorbringt.

2.2 Energieeffiziente Bauteilreinigung

Die wässrige Bauteilreinigung ist hinsichtlich der Frage der Energieeffizienz ein vergleichsweise neues universitäres Forschungsfeld, das aber in der Industrie großes Potenzial in der Anwendung bietet. Ziel der Ansätze ist zum einen ein Transfer der Erfahrungen von der Werkzeugmaschine auf die Reinigungsmaschine sowie zum anderen die Erweiterung des Systemverständnisses. Welchen Energiebedarf der Reinigungsprozess erfordert, hängt maßgeblich davon ab, wie stark die Bauteile verunreinigt sind. Der Prozessführung im letzten formgebenden Zerspanungsprozess kommt insofern eine tragende Rolle zu und wird daher in der ETA-Fabrik sehr genau erforscht. Gleichermäßen eröffnet die Prozesskettenbetrachtung die

2.2 Autoren:

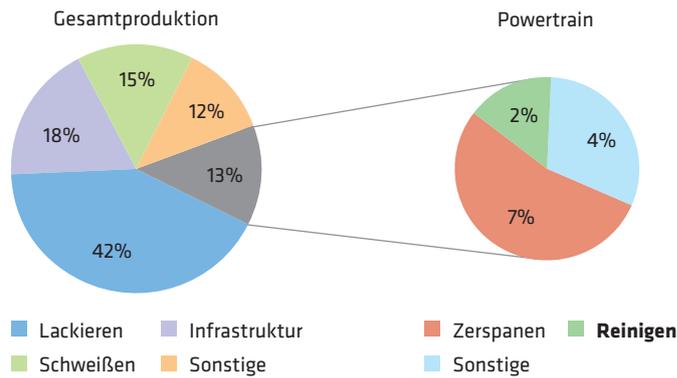
Felix Junge
PTW, TU Darmstadt

Joachim Schwarz
MAFAC – E. Schwarz & Co. GmbH

Andreas Krönauer
Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V.



Verteilung des Energiebedarfs einer Automobilproduktion [%]



Chance, bisher nicht genutzte Abwärme anderweitig zu nutzen. So verwendete man in der ETA-Fabrik erstmals die Abwärme aus den Werkzeugmaschinen, um das Bad von Reinigungsmaschinen mit Hilfe von Wärmepumpen zu beheizen (s. Kap. 3.1).

Hoher Energiebedarf für industrielle Reinigungsprozesse

Insbesondere vor der Montage oder zur Oberflächenvorbehandlung (z.B. Lackieren, Wärmebehandlung) werden Bauteile in der Industrie gereinigt. In den meisten Fällen greift die Industrie dafür auf Nassverfahren zurück, allen voran die Ultraschall-, Tauch- und Spritzreinigung. Einer Untersuchung zufolge macht bei der Automobilproduktion die Reinigung etwa zwei Prozent des gesamten Energiebedarfs aus. In der Powertrain-Fertigung liegt der Anteil der für die Reinigung benötigten Energie mit rund 16 Prozent noch viel höher (Abb. 09).

Innovationen im Bereich der industriellen Reinigung und deren Produktionsanlagen

Um der energetischen Relevanz und der Vielfalt der Einsatzbedingungen Rechnung zu tragen, wurden in der ETA-Fabrik folgende Aspekte untersucht und dafür Energieeinsparkonzepte entwickelt:

- Vollwärmeschutz von Reinigungsanlagen,
- Vermeidung von Abwärme,
- Verringerung von feuchter Abluft,
- interne Weiternutzung von Abwärme,
- Wärmerückgewinnung aus der Bauteiltrocknung,
- Wärmetauscher für Reinigungsmedien,
- Einbindung von Reinigungsanlagen in zentrale Wärmeversorgungssysteme,
- Optimierung von Reinigungsverfahren,
- Analyse von Sonderverfahren mittels Lasertechnologie,
- Vermeidungsstrategien von Verunreinigung und
- Anpassen der Reinigungs-Chemie zur Absenkung der Temperatur.

09 Prozentuale Verteilung des Energiebedarfs in der Produktion eines Automobilherstellers; zwei Prozent entfallen auf Reinigungsverfahren (komplettes Werk); bezieht man dies auf die Powertrain-Fertigung sind es sogar 16 Prozent.

10 Thermografische Untersuchung im Maschinenraum der Reinigungsanlage

11 Beschickung der Laserreinigungsanlage

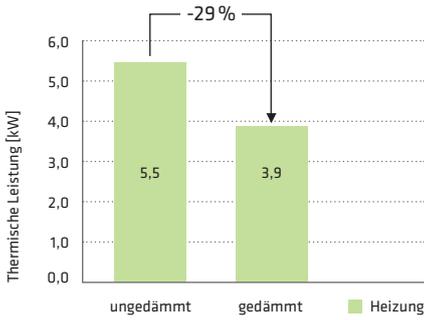


10



11

Wärmebedarf:



weitere Vorteile durch Dämmung der Maschine:



Reduzierung der Schallemission um 9 %



Reduzierung der Wärmestrahlung um 40 %

12 Leistungsvergleich der ungedämmten und gedämmten Reinigungsmaschine für einen ETA-Reinigungsprozess.

Zwei der zuvor aufgezählten Konzepte werden nachfolgend näher erklärt, um einen genaueren Einblick in die Entwicklungsarbeit zu geben.

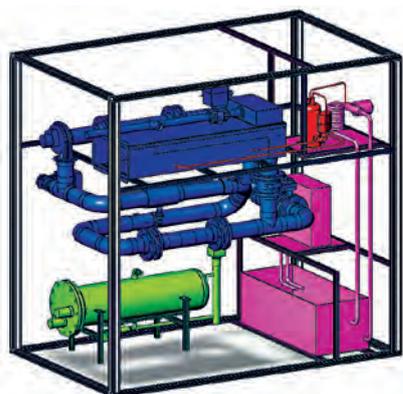
Vollwärmeschutz von Reinigungsmaschinen

Um die Energiebilanz der Reinigungsmaschine MAFAC JAVA zu optimieren, wurde sie prototypisch nach dem „Thermoskannenprinzip“ gedämmt (Abb. 12). Messungen zeigten, dass die Dämmung der Reinigungsmaschine den Wärmebedarf zur Badbeheizung während eines Reinigungsprozesses um bis zu 29 Prozent reduzieren kann. Bezogen auf den Gesamtenergiebedarf der Maschine beträgt das Optimierungspotenzial 15 Prozent und ist damit erheblich.

Auch der Kältebedarf der Produktionsstätte wird damit reduziert. Weitere positive Nebeneffekte ergeben sich durch ein verbessertes Schallemissionsverhalten der Maschine: Der Schalleistungspegel sinkt um rund neun Prozent gegenüber einer nicht isolierten Anlage.

Wärmerückgewinnung aus der Bauteiltrocknung

Um die Energieverluste der Bauteilreinigung weiter zu reduzieren, wurde im Rahmen des Projekts eine Lösung zur Rekuperation der Abwärme aus der Trocknungsabluft entwickelt. Basis des Moduls ist eine Wärmepumpe, die auf ihrer kalten Seite die Restfeuchte auskondensiert und den Reinigungstanks wieder zuführt (Abb. 13). Durch die frei werdende Energie wird Wärme genutzt, mit der sich die Temperatur der Medien auf konstantem Niveau halten lässt. Das Ergebnis dieser Optimierung ist eine sehr positive Energiebilanz, da mit einer geringen elektrischen Leistungsaufnahme für die Wärmepumpe eine zusätzliche Beheizung komplett entfallen kann.



13 Modell und Aufbau des Wärmepumpen-Moduls

2.3 Energieeffiziente Wärmebehandlung

Insbesondere die Wärmebehandlung ist sehr energieintensiv, weshalb sich hier maschinenbezogene Einsparungen sehr stark auf den Gesamtenergiebedarf der Fabrik auswirken. So zielen die in der ETA-Fabrik am Demonstrator (Gasnitrierofen IVA RH655) erprobten Konzepte primär darauf ab, die eingesetzte Energie im Hauptprozess sowie in den Nebenprozessen und Komponenten zu minimieren. Zugleich zeigt sich die Bedeutung und das besondere Potenzial interner (Ab-)Wärmerückgewinnung.

Wer sich entscheidet, diese Optimierungen umzusetzen, kann mehr als 40 Prozent des Gesamtenergiebedarfs einsparen und zusätzlich den Prozessgasverbrauch reduzieren.

Innovationen im Bereich der Wärmebehandlung

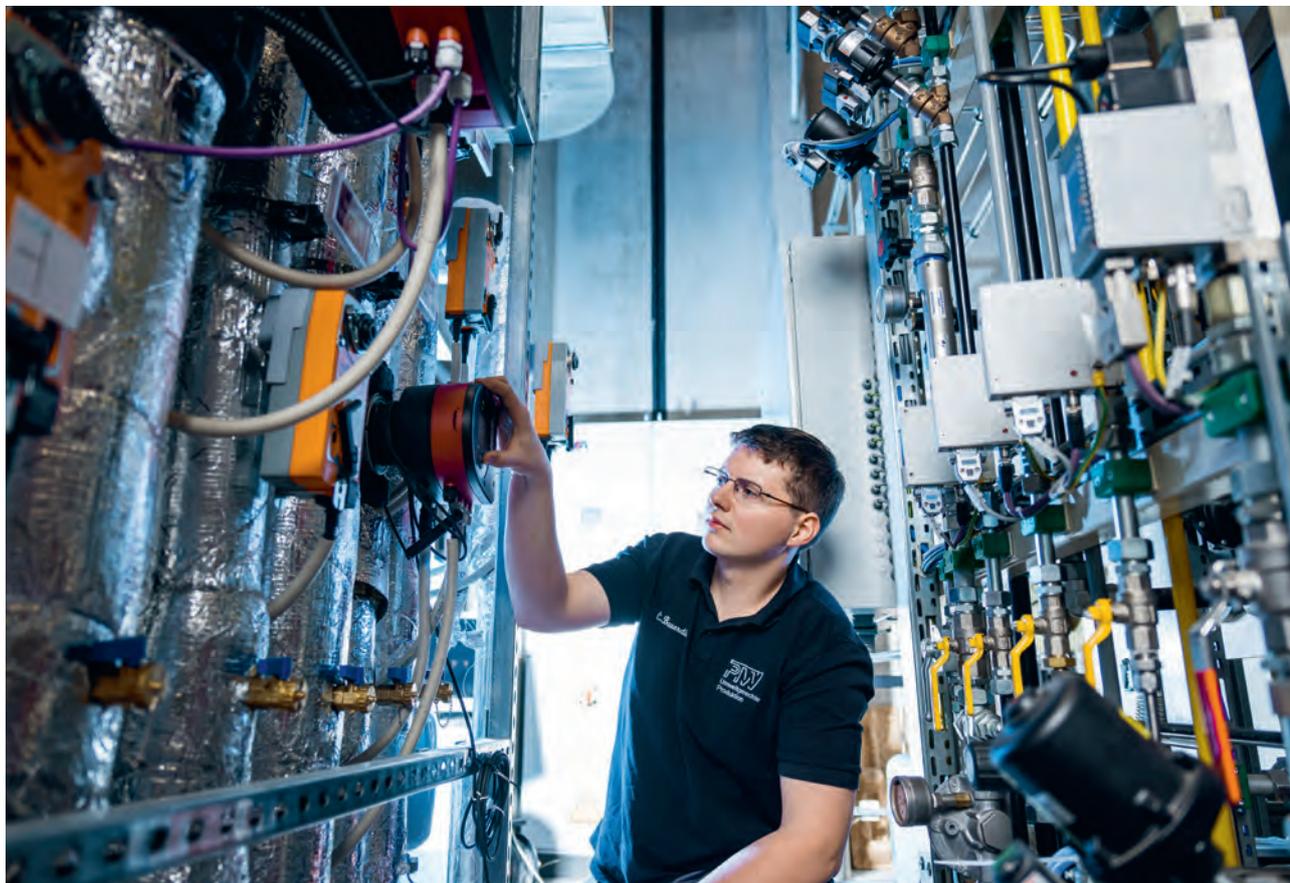
Im Jahr 2016 umfasste der Gesamtenergieverbrauch zur Herstellung von Metallerzeugnissen rund 25 TWh. Damit ist diese Branche einer der bedeutendsten Energieverbraucher in der deutschen Industrie [DESTATIS]. In 2010 entfielen rund 30 Prozent der Energie auf die Oberflächenveredelung, zu der die Wärmebehandlung zählt. Im ETA-Projekt wurden folgende elf Aspekte identifiziert, die ein mögliches Einsparpotential aufweisen:

2.3 Autoren:

Christoph Bauerdick
PTW, TU Darmstadt

Dr. Klümper-Westkamp
IWT Bremen

14 Kühlung des Ofens durch das Hallennetz mit in Reihe geschalteten Kühlkreisläufen, um die Ausgangstemperatur zu erhöhen.





15 In allen drei Varianten haben sich gleiche Schichtstärken der Verbindungsschicht eingestellt: links bei konstanter Begasung, mittig bei Nitrierkennzahlregelung und rechts bei gepulstem Nitrieren.

- Nitrierkennzahlregelung,
- gepulstes Nitrieren,
- Entwicklung einer effizienteren Abgasfackel,
- Oberflächendämmung des Ofens,
- Reihenschaltung der Kühlkreisläufe, um die Ausgangstemperatur zu erhöhen,
- Abgaswärmetauscher für Abgasfackel,
- Rekuperator-Brenner,
- Regelung des Verbrennungsluftgebläses,
- langsamerer Kühlprozess,
- geringere Umwälzergeschwindigkeit und
- CFC-Chargiergestell.

Reduktion des Prozessgasverbrauchs durch kennzahlgeregelte und gepulste Prozessführung

Zur Randschichthärtung mittels Gasnitrier- oder Gasnitrocarburierverfahren werden Prozessgase wie Ammoniak und Kohlenstoffdioxid benötigt. In den meisten Öfen werden die Prozessgase mit einem konstanten Volumenstrom in die 500 bis 590 °C heiße Reaktionskammer eingeleitet. Auf diese Weise ist ein permanentes Überangebot an Prozessgas gesichert, um eine stabile Reaktion zu gewährleisten. Überschüssiges Prozessgas wird abgeführt und verbrannt. Es wurden zwei Varianten erforscht, um Prozessgas einzusparen:

1) Nitrierkennzahlregelung: Hierbei wird mittels Sensorik der Ammoniak- und Wasserstoffanteil im Ofen geregelt. Es strömt genau soviel Prozessgas ein, dass sich eine ideale Reaktionsatmosphäre einstellt. Dennoch bleibt ein kontinuierlicher Strom des Prozessgases unerlässlich, damit keine Luft in den Ofen eindringen kann.

2) Gepulstes Nitrieren: Bei diesem Verfahren gelangt das Prozessgas nicht permanent, sondern in zeitlichen Abständen und mit leichtem Überdruck in den luftdicht abgeschlossenen Ofen. Nach zehn Minuten wird dann das Prozessgas im Ofen ausgetauscht.



Die Ergebnisse fasst Abb. 15 zusammen: Es ist ersichtlich, dass beide Verfahren die gleiche Schichtstärke der Verbindungsschicht hervorbringen wie bei einem konstanten Gasfluss. Der Gasverbrauch sinkt jedoch bei der Nitrierkennzahlregelung um etwa zehn Prozent und beim gepulsten Nitrieren um fast 40 Prozent.

16 Abgasfackel mit Abgaswärmetauscher

Entwicklung einer effizienteren Abgasfackel

Einer der größten Energieverbraucher beim Gasnitrieren bzw. Gasnitrocarburieren ist die Abgasfackel. Sie wird benötigt, um die überschüssigen Prozessgase zu verbrennen, die ansonsten die Umgebung gefährden könnten. Sie wird mit Brenngas (Erdgas) und Luft betrieben. Auch der im Abgas enthaltene Wasserstoff (50 bis 75 Prozent beim Nitrieren) hält den Brennvorgang am Laufen. In der Regel verpufft somit die in der Abwärme der Abgasfackel enthaltene Energie und ist damit verloren. Mit einem Abgaswärmetauscher ließe sich jedoch ein Teil der Abwärme zurückgewinnen (Abb. 16).

Deutlich effizienter ist es jedoch, die Abgasfackel direkt in die Ofenheizung zu integrieren. Dazu wurde im Projekt ein neuer Rekuperator-Abgasbrenner entwickelt. Rekuperator-Brenner nutzen ihre eigene Abwärme, um zuströmendes Brenngas vorzuheizen, was die Effizienz eines solchen Ofens deutlich erhöht. Während der Versuchsreihen mit dem Demonstrator wurde festgestellt, dass der entwickelte Abgasbrenner mit Hilfe von Brenngas zunächst zwar auf rund 900 °C vorgeheizt werden muss, danach aber die Erdgaszufuhr geschlossen werden kann. Der Wasserstoffanteil im Abgas reicht nämlich aus, um die be-



17



18



19

nötigten Temperaturen zur sicheren Nachverbrennung aufrecht zu erhalten. Damit konnten im ETA-Projekt mehr als 20 Prozent des Erdgases eingespart werden, das für den Härteprozess benötigt wird. Die neu entwickelte Abgasfackel kann nun zusätzlich weiter optimiert werden, um sie in der Ofenheizung zu integrieren. Dazu bedarf es jedoch eines Sicherheitskonzeptes, da eine eventuelle Anreicherung von Prozessgas in der Brennkammer in jedem Fall vermieden werden muss.

Nutzenergie minimieren, Wirkungsgrad steigern

Maschinen- und themenübergreifend haben die am ETA-Projekt beteiligten Forscher viele Potenziale ausgemacht und Lösungen entwickelt, um Produktionsmaschinen energieeffizienter zu konzipieren und zu betreiben. Ausgehend vom wertschöpfenden Produktionsprozess fokussieren sich die Verbesserungsvorschläge darauf, die bereitgestellte Nutzenergie zu minimieren und den Wirkungsgrads bei der Wandlung in die benötigte Nutzenergieform zu steigern. Das gelingt, indem man die Komponenten so gestaltet, dass die Energieaufnahme bedarfsgerecht erfolgt. Gleichmaßen können beispielsweise die Anschlussleistung sowie die emittierte, eventuell zu kühlende Wärmeabgabe (Abwärme) der Maschinen einschließlich deren Komponenten reduziert werden. Eingriffe auf Komponentenebene beeinflussen somit unmittelbar die Versorgungsinfrastruktur sowie das Raumklima einer Fabrik. Die Optimierungen an einzelnen Querschnittstechnologien hängen nicht zwingend von der jeweiligen Anwendung ab und lassen sich somit auf viele andere Industriebranchen übertragen. Grundsätzlich können in jeder Fabrik und bei jeder Maschine die Verluste minimiert, die Abwärme zurückgewonnen und ein verbessertes Energiemanagement durch Datenanalyse erreicht werden (Abb. 19). ■



20

17 Durch das Dämmen von Maschinen und Komponenten lässt sich deren Gesamtenergiebedarf erheblich senken.

18 Neu entwickelter Abgasbrenner (Versuchsaufbau)

3.0 Energetische Vernetzung

Autoren:

Martin Beck, Nina Strobel,
Niklas Panten
PTW, TU Darmstadt
Michael Richter
IMS, TU Darmstadt
Mitarbeit:
ZAE Bayern e. V.
IWB, Uni Stuttgart

Die Endenergieformen für die Prozesskette in der ETA-Fabrik sind Strom und Erdgas, die aus übergeordneten Versorgungsnetzen bezogen werden. Diese werden in der Fabrik in weitere Energieformen (Wärme, Kälte, Druckluft) umgewandelt oder direkt von den Produktionsanlagen genutzt. Verschiedene Energiespeichersysteme können den Bezug von Endenergie zeitlich von der Nutzung durch die Produktionsanlagen entkoppeln. So lässt sich verfügbare Umweltenergie (zum Beispiel kühle Temperaturen in der Nacht) effizient nutzen. Zudem bieten verschiedene miteinander vernetzte Energieformen sowie miteinander vernetzte Anlagen den Vorteil, bisher ungenutzte Abwärmeströme einzukoppeln und so die Effizienz auf einen Schlag zu erhöhen.

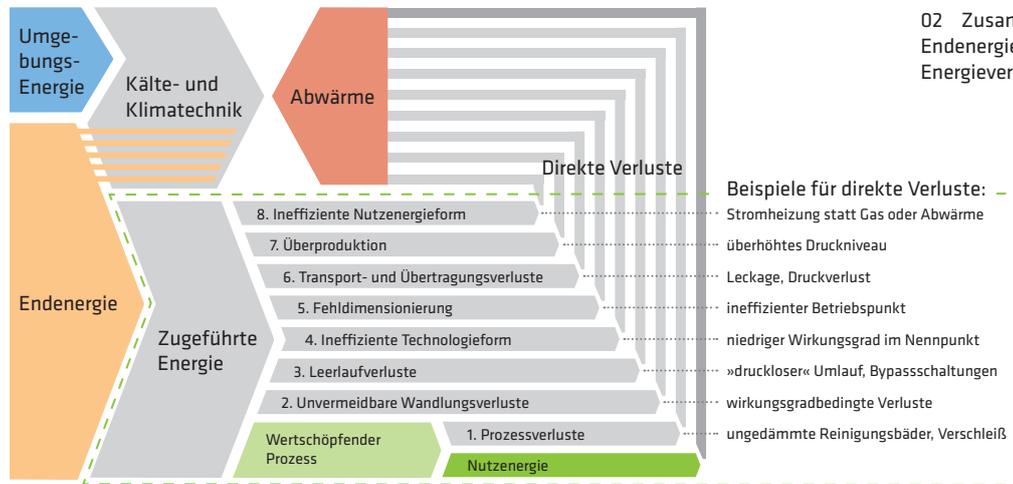
3.1 Thermische Vernetzung

Immer dann, wenn Wärme von einer Quelle zu einer Senke transportiert wird, entsteht eine thermische Vernetzung. Ein entsprechender Austausch ergibt sich beispielsweise zwischen den Komponenten einer Produktionsmaschine und der umgebenden Raumluft. Alternativ, jedoch auch zusätzlich, kann Wärme über einen wasserbasierten Kühlkreislauf transportiert werden.

Mit einer zielgerichteten thermischen Vernetzung lässt sich die Abwärme nutzen, um eine effiziente Rückkühlung nicht verwertbarer Abwärme an eine Wärmesenke außerhalb des

Typische Temperaturbereiche von Abwärmequellen		Typische Temperaturbereiche von Wärmesenken	
Raumabluft	16–30 °C	Raumzuluft	16–26 °C
Abluft aus Kühlprozessen	20–60 °C	Wässrige Reinigungsbäder	50–85 °C
Rücklauf aus Kalt- und Kühlwasseranlagen	20–60 °C	Raumbeheizung	30–80 °C
Abgase aus Verbrennungs- und Verfahrensprozessen	50–450 °C	Wärmewandler (Sorptionskältemaschinen, ORC-Prozesse, etc.)	60–650 °C

01 Typische Temperaturen im Umfeld einer Produktionsprozesskette der Metallbearbeitung.



02 Zusammenhang der Endenergienutzung sowie der Energieverschwendungsarten



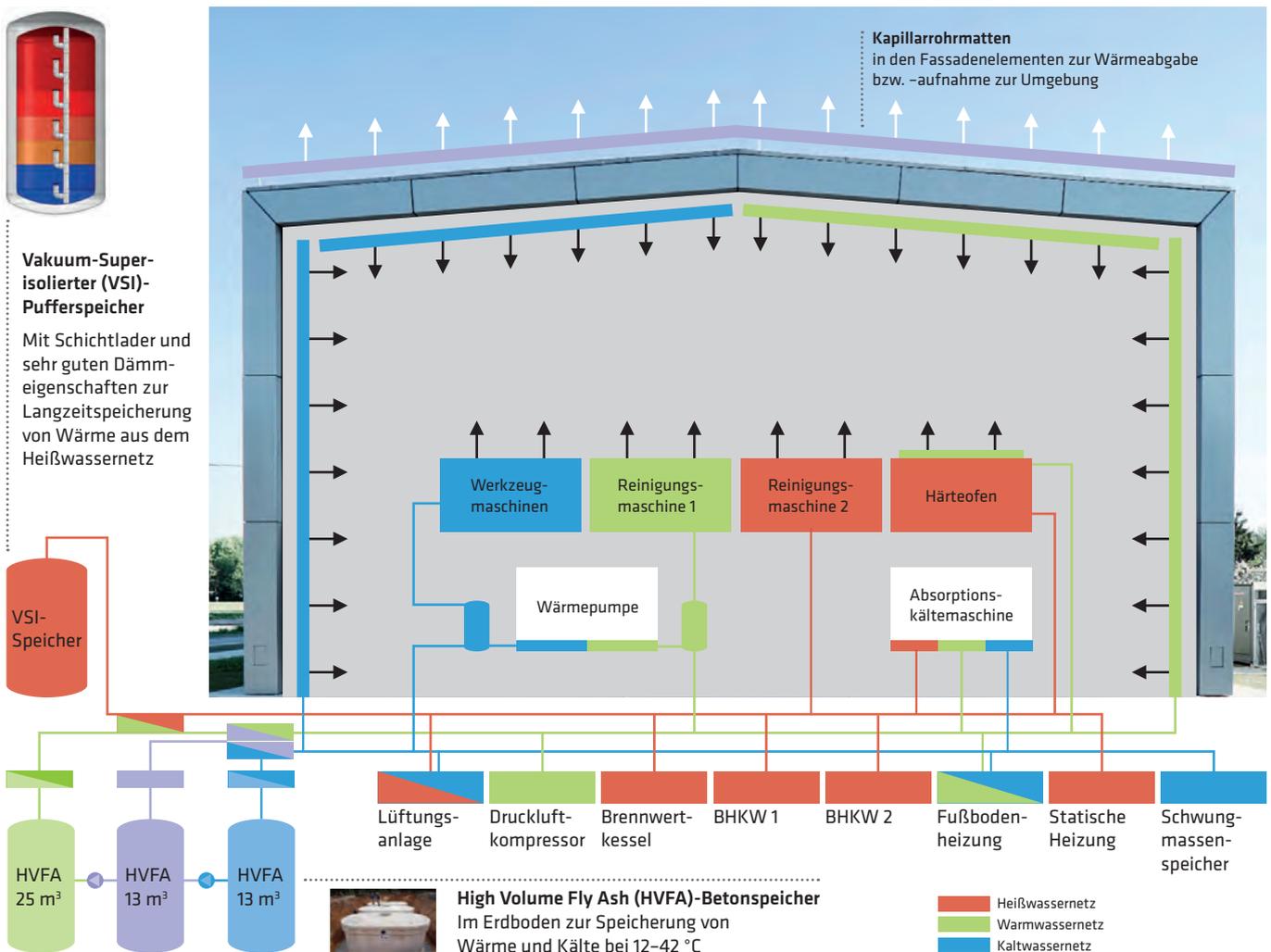
Bilanzraumes eines Produktionsbetriebes zu ermöglichen. Die typischen Temperaturen von Abwärme im Umfeld der zerspannenden Produktion hängen von der jeweiligen Anwendung ab (Abb. 01, linke Spalte).

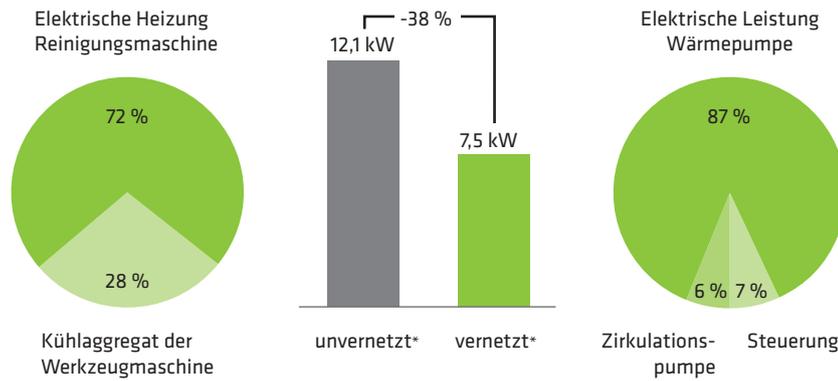
Die Höhe der Abwärmemenge ist ein Gradmesser für die Effizienz der Produktion

Endenergie wandelt sich im Kontext einer mechanischen Produktion fast vollständig in Abwärme (Abb. 02). Je geringer die entstehende Abwärmemenge, umso höher ist die die Effizienz eines Produktionsumfeldes. Zudem resultieren aus der Abwärme Folgekosten, wenn aus diesem Grund das Produktionsgebäude gekühlt werden muss.

Ausgehend von der Optimierung einzelner Maschinen (siehe Kapitel 2.0) zielt die Vernetzung darauf ab, verbleibende Wärme-flüsse optimal einzubinden. Technisch bilden drei wasserbasierte thermohydraulische Rohrleitungssysteme die Grundstruktur der thermischen Vernetzung in der ETA-Fabrik:

04 Technische Umsetzung der thermischen Vernetzung in der ETA-Fabrik.





*Unter Berücksichtigung einer Kühllast von durchschnittlich 7,2kW und einer Heizlast von durchschnittlich 8,7kW

- ein Kaltwassernetz (10 bis 20 °C) zur Kühlung von Produktionsmaschinen und des Gebäudes im Sommerlastfall;
- ein Warmwassernetz (30 bis 40 °C) zur Rückkühlung bzw. Beheizung weiterer Maschinen sowie zur Niedertemperaturbeheizung des Gebäudes im Winter;
- ein Heißwassernetz (70 bis 85 °C) zum Antrieb der Absorptionskältemaschine, gespeist aus Hochtemperaturabwärme des Ofens sowie von zwei Blockheizkraftwerken und einem Gasbrennwertgerät.

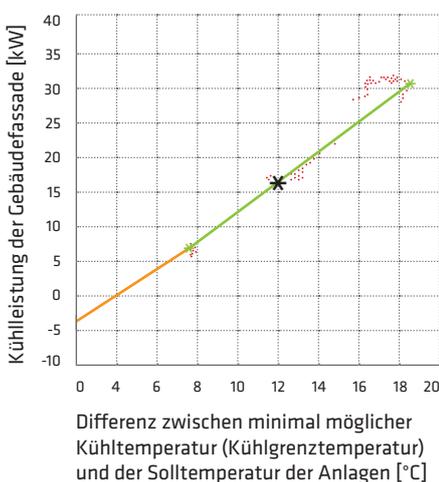
05 Nachgewiesene Einsparung am Beispiel von miteinander vernetzten Werkzeug- und Reinigungsmaschinen.

In diese auch für die Industrie typische Grundstruktur wurden alle in Abb. 04 aufgezeigten Systeme integriert. Je nach Betriebszenario können einzelne Komponenten verschiedenen Netzen zugeschaltet werden. So wird die Produktionsabwärme im Sommer über die Gebäudehülle abgeführt und im Winter zur Gebäudeheizung genutzt.

Monitoringergebnisse aus der Simulation und dem Betrieb der thermischen Netze

Das Gesamtsystem ETA-Fabrik kann anhand verschiedener Szenarien im realen Betrieb getestet werden. Über 2.000 implementierte Datenpunkte zeichnen die Ergebnisse zum aktuellen Zeitpunkt auf und ermöglichen eine detaillierte Analyse. Ein Beispiel für die thermische Vernetzung auf Maschinenebene ist die Nutzung von Abwärme der Werkzeugmaschinen (Abb. 05). Mit

06 Leistungsfähigkeit der Kapillarrohrmatten bei der Rückkühlung des Kalt- und Warmwassernetzes.



* Markiertes Beispiel:
Verfügbare Kühlleistung für die Werkzeugmaschinen bei einer Kühlgrenztemperatur von 8 °C und einer geforderten Solltemperatur von 20 °C (→ Differenz = 12 °C) = ca. 16 kW



Ergebnisse basieren auf den Messdaten der Produktionswoche im August 2017

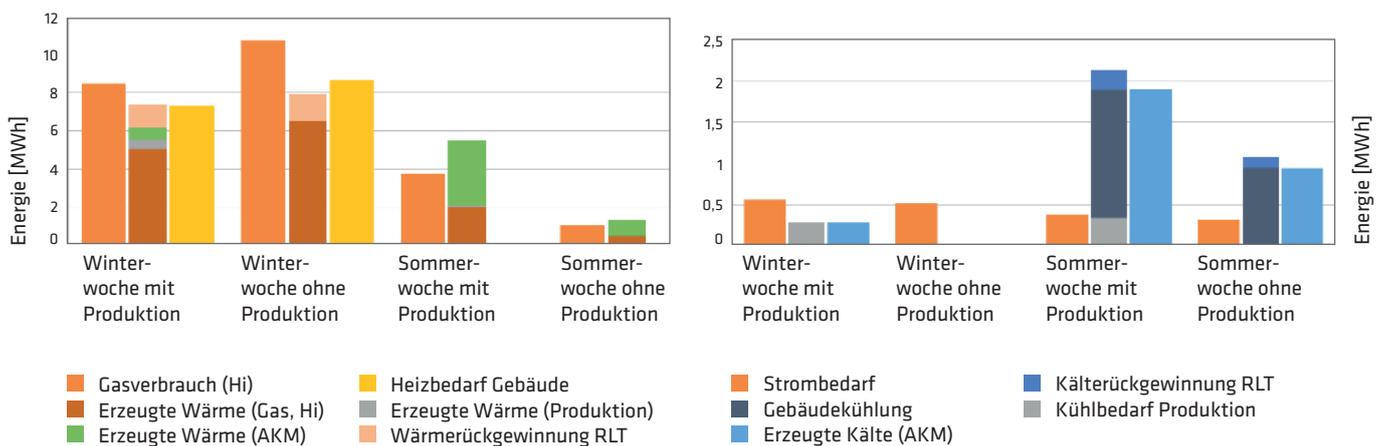


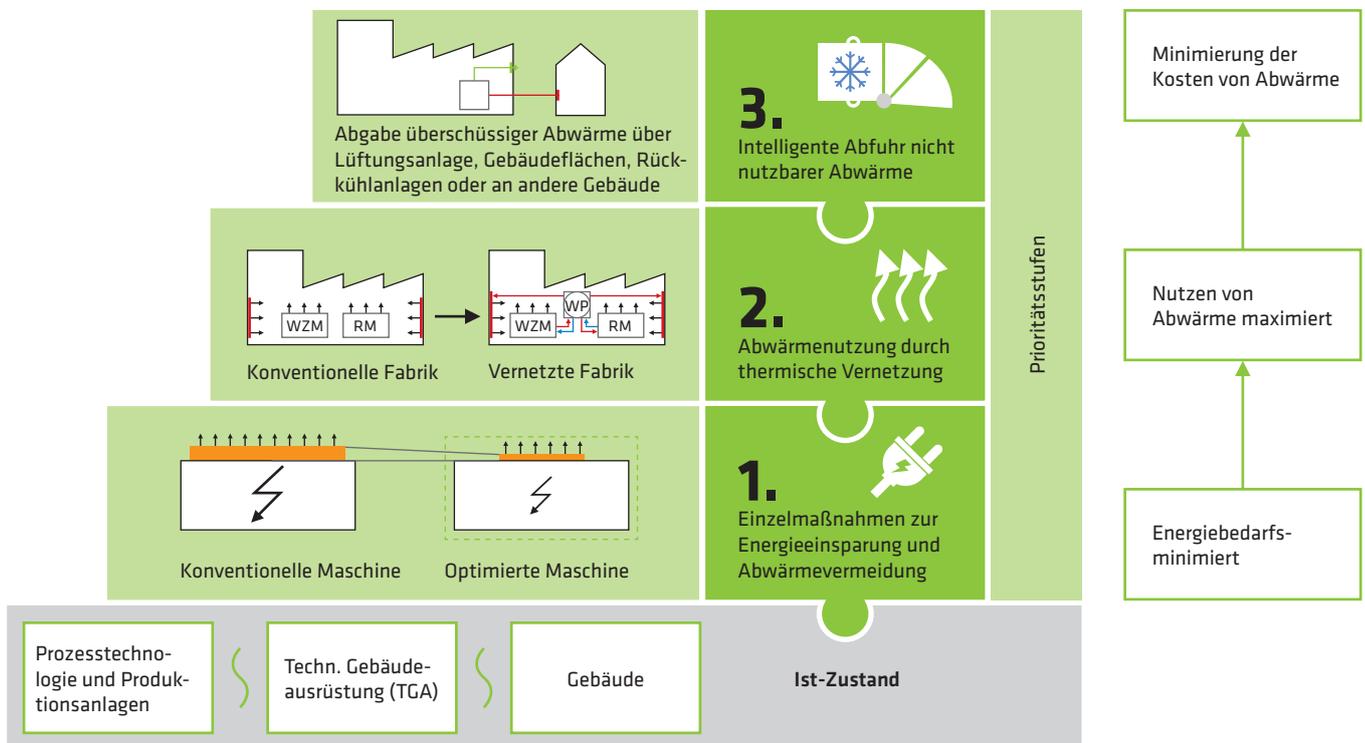
07

Hilfe einer Wärmepumpe wird dieses niedrige Temperaturniveau zur Beheizung eines Reinigungsprozesses genutzt. Dieses Szenario ergab neben der gesteigerten Effizienz auf Maschinenebene weitere Einsparungen in Höhe von rund 40 Prozent.

Neben der Vernetzung auf Maschinenebene geht es in der ETA-Fabrik auch darum, das Gebäude in die Netze mit einzubinden und den dadurch möglichen Effizienzgewinn zu analysieren. Auf Basis der Abwärmeprofile der verschiedenen Produktionsmaschinen, Wetterdaten und des elektrischen Energiebedarfes der Pumpen wurde die Leistungsfähigkeit der aktivierbaren Außenfassaden als ein zentrales Element der thermischen Vernetzung

08 Ergebnisse aus dem Simulationsmodell der thermischen Vernetzung.





untersucht (Abb. 06). Der Effizienzgewinn hat sich hier ebenso bestätigt wie die Leistungsfähigkeit der aktivierten Innenfassaden zur sommerlichen und winterlichen Klimatisierung.

Anhand der gewonnen Messdaten wurden Simulationsmodelle parametrisiert, mit deren Hilfe die Energiebilanz des Gesamtsystems in verschiedene Betriebsszenarien prognostiziert werden kann (Abb. 08).

Energetische Vernetzung steigert die Effizienz, schafft jedoch Abhängigkeiten

Ein thermohydraulisches Netzwerk als Basis einer thermischen Vernetzung ermöglicht es einerseits, Abwärme aus dem Produktionsprozess effizient zu sammeln und abzuführen. Weiterhin kann eine effiziente Dissipation an die Umgebung oder eine Weiternutzung erfolgen. Bevor eine thermische Vernetzung umgesetzt wird, müssen Maschinen und Komponenten in ihrer Effizienz optimiert werden (Abb. 09). Die energetische Vernetzung schafft sowohl energetische als auch örtliche Abhängigkeiten, die sorgfältig abzuwägen sind. Eine thermische Vernetzung steigert jedoch in einer Fabrik zweifellos die Effizienz im Sinne einer Primärenergieeinsparung.

09 Der für die ETA-Fabrik entwickelte bottom-up-Ansatz für ein optimales Abwärmemanagement.



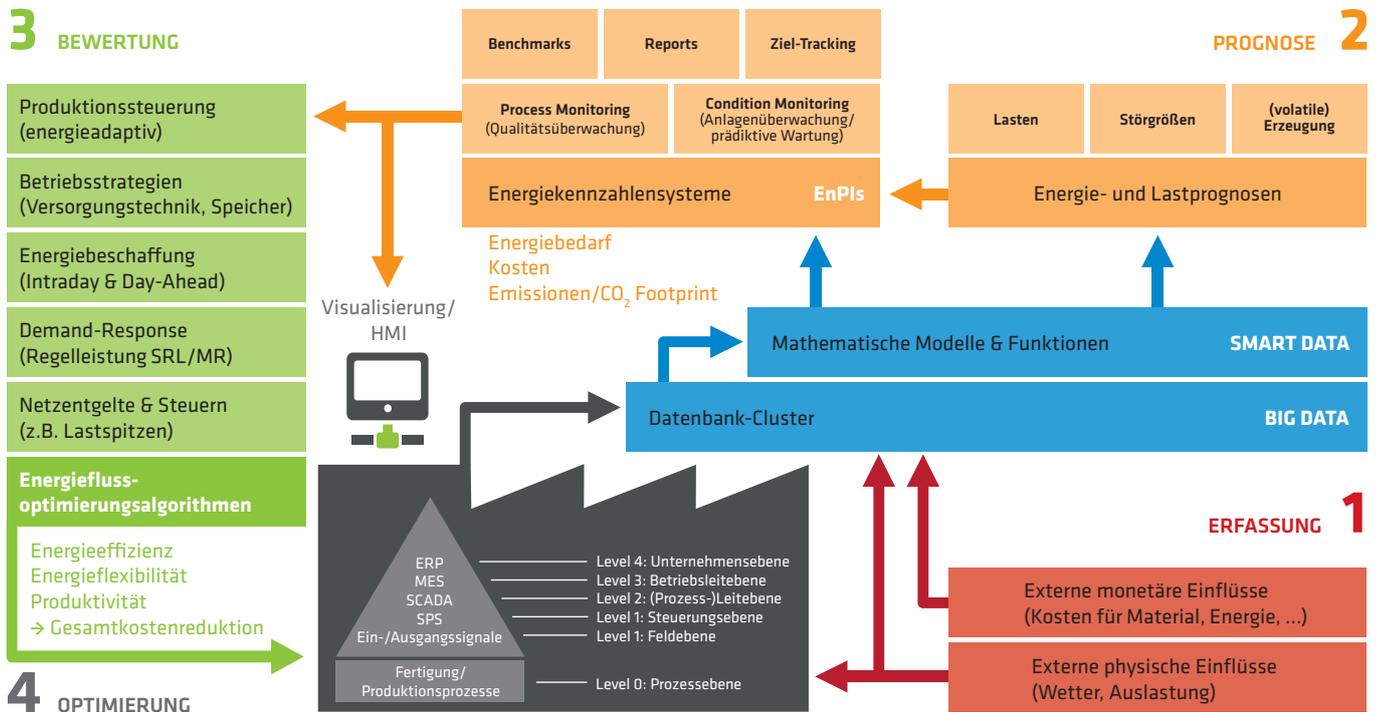
3.2 Energiedaten in der ETA-Fabrik

Der Energiebedarf und der aktuelle Zustand des Energiesystems in einer Prozesskette muss bekannt sein, um zukunftssicher zu investieren und somit effektiv sowohl den Energiebedarf als auch die Kosten zu reduzieren. Vor diesem Hintergrund werden in der ETA-Fabrik in Echtzeit kontinuierlich mehr als 2.000 Datenpunkte von verschiedensten Sensoren sowie Aktoren erfasst und ausgewertet.

Thematische Einordnung und Relevanz

„You can't manage what you don't measure“ ist ein altbekanntes Sprichwort im Management, das nicht weniger oder vielleicht sogar in besonderem Maße für das Energiemanagement in der Produktion gilt. Während zahlreiche Studien und Forschungsprojekte das erhebliche wirtschaftlich erschließbare Energieeffizienzpotenzial in der deutschen Industrie aufzeigen, scheitern die Umsetzungen hauptsächlich an der mangelnden Datengrundlage, um analysieren zu können, wie sich die energetischen und wirtschaftlichen Maßnahmen auswirken. Eine besonders





anspruchsvolle Domäne ist hierbei die Bewertung von Energieflüssen, deren Bedeutung in Unternehmen häufig unterschätzt wird. Denn Energieflüsse sind für gewöhnlich

- nicht unmittelbar sichtbar,
- hoch dynamisch,
- räumlich sowie zeitlich allgegenwärtig und
- stets verzerrt durch eine Vielzahl zeitvariabler Einflussfaktoren.

Dank geeigneter Messwerkzeuge und der fortgeschrittenen Informationstechnik kann man durch detailliertes Energiemonitoring die Energieflüsse systematisch erfassen und sie mit relevanten Einflussgrößen wie z.B. Wetter oder Produktionsdaten in Beziehung setzen. Die Daten versetzen Forscher und Energiemanager in der Industrie in die Lage, die energetischen Wechselwirkungen in der gebotenen Tiefe zu verstehen. Sie dokumentieren den Erfolg von Energiemanagementprojekten und geben eine Vorstellung vom zukünftigen Energiebedarf. Ein effektives Energiemonitoring warnt frühzeitig vor übermäßigem Verbrauch, der zum Beispiel durch Fehlfunktionen von Geräten, unerwünschtes Benutzerverhalten oder fehlende Wartung verursacht wird.

Das übergeordnete Ziel des Monitorings ist stets, aus den Energiedaten fundierte Maßnahmen abzuleiten, um Energiekosten und Emissionen zu senken. Die Energieeffizienz zu steigern ist das Eine – es geht aber auch darum, auf Basis der Energiedaten effiziente Laststeuerungsstrategien zu identifizieren und die Energiebeschaffung zu optimieren.

12 Kreislauf der Energiedaten von der Erfassung bis zur Optimierung

Projektergebnisse im Bereich des Energiemonitorings

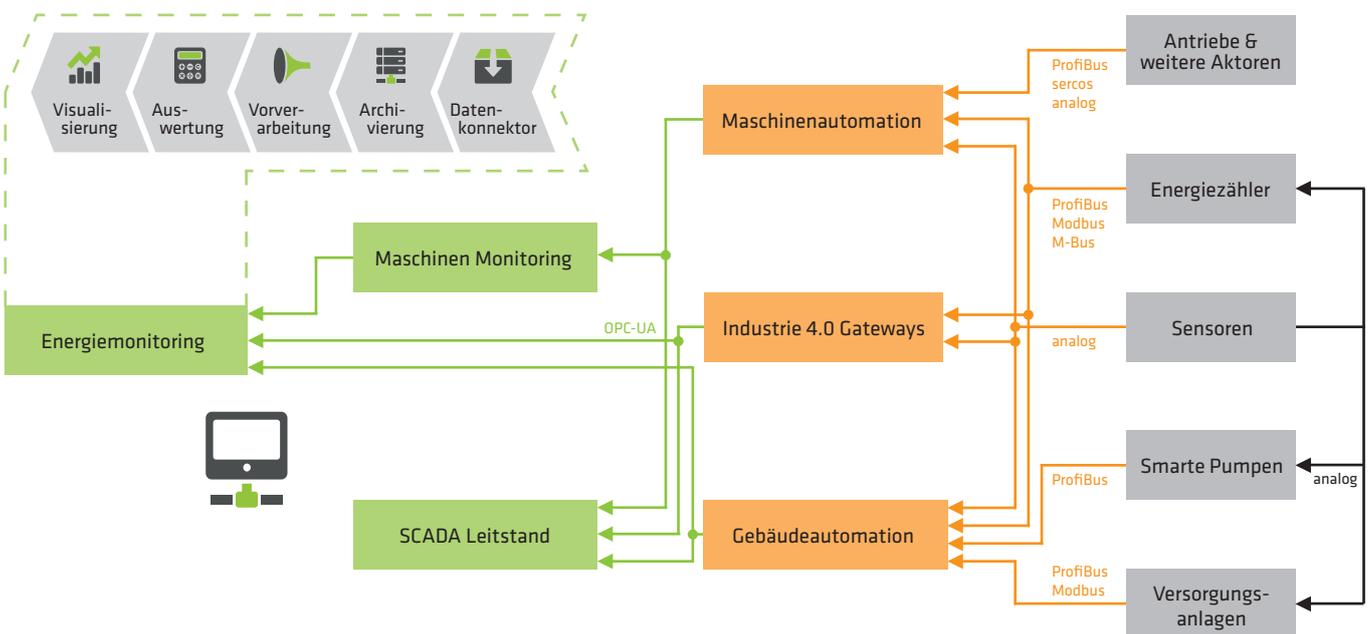
Im Rahmen des Projektes wurde eine Methodik zur Auslegung von Messstellen-systemen entwickelt. Ausgehend von den individuellen Zielsetzungen des Energiemanagements auf Unternehmens-, Bereichs- oder Anlagenebene und den daraus abgeleiteten Kennzahlen lassen sich so systematisch die notwendigen Messstellen für verschiedene energetische Aufwands-, Nutz- und Einflussgrößen identifizieren.

Um den realen Energiebedarf in der Praxis zu ermitteln, bedarf es erheblicher Investitionen in Messmittel. Aus diesem Grund erfolgt die Erfassung häufig nur auf aggregierter Systemebene. In der ETA-Fabrik wurde hingegen für Forschungszwecke ein umfassendes anlagenscharfes Energiemonitoring implementiert. Zahlreiche Energie- und Prozessdaten werden dafür über das standardisierte Kommunikationsprotokoll OPC-UA auf Leitebene bereitgestellt. Eine Energiemonitoringsoftware ruft diese ab und archiviert sie anschließend in einer Datenbank.

Um die Energietransparenz in der Industrie flächendeckend zu erhöhen, sind die Kosten für die Beschaffung, Installation und Anbindung von Energiemessstellen unbedingt zu reduzieren. Vor diesem Hintergrund wurden sensorreduzierte Energiedatenerfassungskonzepte untersucht und entwickelt. Bei den Verfahren werden die durch „intelligente“ Komponenten bereitgestellten Sensordaten mit Systemmodellen gekoppelt oder aggregierte Messstellen (z.B. am Hauptanschluss) in Kombination mit Prozessdaten durch Algorithmen in ihre unterlagerten Bestandteile zerlegt („Disaggregation“).

Um hochfrequente Maschinendaten (z.B. von drehzahlvariablen Antriebssystemen) erfassen und verarbeiten zu können wurde eine flexible und leistungsstarke Datenanalyse-Plattform entwickelt. Der webbasierte Data Analytics Server konsolidiert und analysiert Maschinen- und Prozessdaten, um die Verfügbarkeit und Produktivität von Fertigungsanlagen zu steigern. Über vordefinierte mathematische Methoden sowie Visualisierung gewährleistet die Software eine einfache Analyse der Energiedaten zur Qualitätskontrolle des Produktionsprozesses, der Prozessverbesserung und vorbeugenden Instandhaltung.

13 Prinzip der Energiedatenerfassung in der ETA-Fabrik





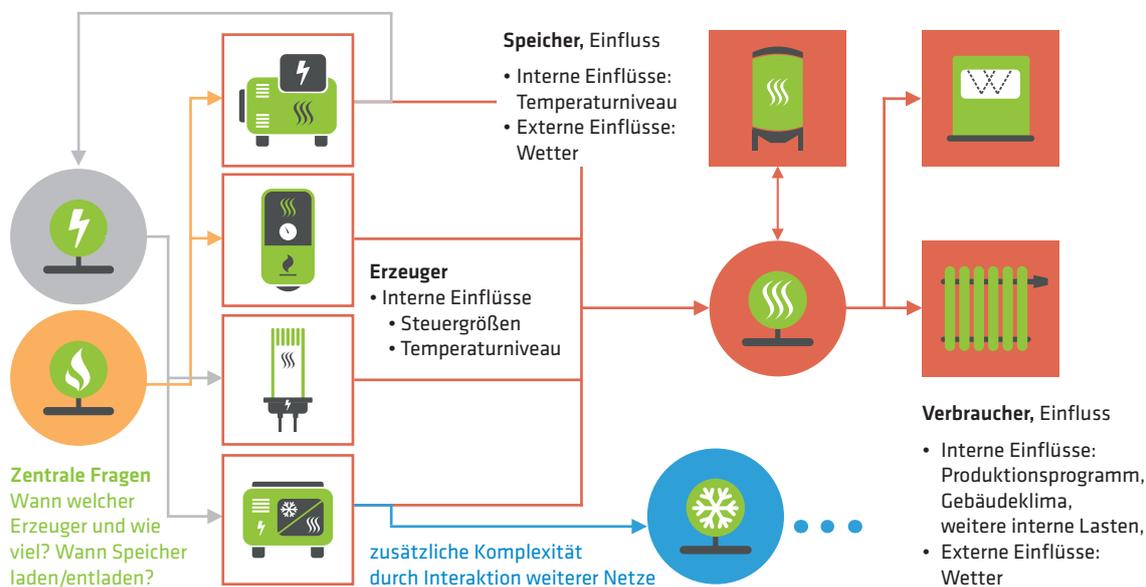
14

In einem weiteren Schritt ist es im Rahmen des Energiemanagements notwendig, die großen Datenmengen für unterschiedliche Zielgruppen zu aussagekräftigen Energiekennzahlen zu verdichten. Dafür wurde ein umfassendes Kennzahlensystem entwickelt, das speziell darauf ausgerichtet ist, die komplexe energetische Interaktion der ETA-Fabrik adäquat zu bewerten.

Fazit und Ausblick

Die Erfassung von Energiedaten und deren intelligente Auswertung sind zentrale Enabler für ein erfolgreiches Energiemanagement. Die ETA-Fabrik demonstriert modellhaft, wie der Energiebedarf in der Produktion transparent gemacht und Energiedaten gewinnbringend verarbeitet werden können. Neuartige Geschäftsmodelle steigern die Bedeutung der Digitalisierung und rücken die vielfältigen Optimierungspotenziale in den Fokus. Aufgrund dessen wird die Verfügbarkeit hochwertiger Daten und deren Wert weiter exponentiell wachsen. Dass in der ETA-Fabrik genau diese Daten sehr komfortabel erbracht und analysiert werden können, ist die Ausgangsbasis für Nachfolgeprojekte, die sich mit der automatisierten, intelligenten Auswertung dieser Datenmengen beschäftigen. Leistungsfähige Hardware und Innovationen im Bereich des maschinellen Lernens und der Optimierung ermöglichen gegenwärtig aus dem Netzwerk der ETA-Fabrik heraus vielfältige Forschungsansätze für unterschiedliche Applikationen (z.B. Prognose, Predictive Maintenance, Betriebsoptimierung).

33



15 Prinzipschema der energetischen Vernetzung und der Aspekte der Energieflusssteuerung.

3.3 Energieflussregelung in der ETA-Fabrik

Die energetische Vernetzung der Teilsysteme in der ETA-Fabrik mit verschiedenen Energiewandlern und -speichern sowie zahlreichen Pumpen und Ventilen bedarf einer intelligenten Orchestrierung aller Aktoren. Dazu wurden alle Aktoren der Gebäude- und Versorgungstechnik informationstechnisch an ein Automations-system angebunden, dessen Programmablauf gewährleisten soll, dass unterschiedliche Versorgungsmedien zur Nutzung bereitstehen. Die aktive Laststeuerung der Anlagen spart zusätzlich Kosten ein.

Die Energieflussregelung bestimmt neben der Energieeffizienz auch die Produktivität einer Fabrik

Eine Fabrik kann nur produktiv sein, wenn die notwendigen Versorgungsmedien (z.B. Strom, Wärme, Kälte, Druckluft) für den Betrieb der Produktionsmaschinen auf Abruf bereitstehen. Werden jedoch Versorgungsmedien dauerhaft, also auch bei Stillstand, und auf zu hohem Exergieniveau aufbereitet, ergeben sich durch ungünstige Betriebsmodi Verluste in der Energieeffizienz – auch beim Transport der Medien und deren Speicherung. Ein weiteres Problem – insbesondere in thermisch vernetzten Produktionsumgebungen – sind unterschiedliche Typen von Energiewandlern, die eine bestimmte geforderte Energieart bereitstellen (Multivalenzprinzip, z.B. Wärme durch Erdgas oder Strom). Deren spezifische Betriebskosten können sich je nach Zustand der Anlagen, Netze und Energiemärkte stark unterscheiden. Ferner wirkt sich die Betriebsweise der Anlagen auf die Spitzenlasten an Netzanschlusspunkten aus, die wiederum technischen Restriktionen unterliegen sowie durch lastabhängige Netzentgelte Kosten verursachen.

Eine intelligente Betriebsführung berücksichtigt diese vielfältigen Anforderungen und regelt die Aktoren, um eine möglichst effiziente Konstellation beim Energiefluss zu erreichen. Die zahlreichen zeitvariablen Einflussfaktoren, nichtlinearen Systemeigenschaften und komplexen energetischen Interaktionen belegen die Relevanz der Energieflussregelung und umso mehr deren Optimierung als eine herausfordernde Domäne in der Forschung.

Projektergebnisse im Bereich der Energieflusssteuerung

Mit dem Aufbau einer durchgehend informationstechnisch vernetzten, zentralen Versorgungsautomation wurden bei der ETA-Fabrik die wesentlichen Grundlagen für eine effiziente Energieflusssteuerung geschaffen. Zahlreiche Sensoren und Aktoren werden über eine Industriesteuerung und verschiedenste digitale Feldbusse und Analogsignale ausgelesen und angesteuert.

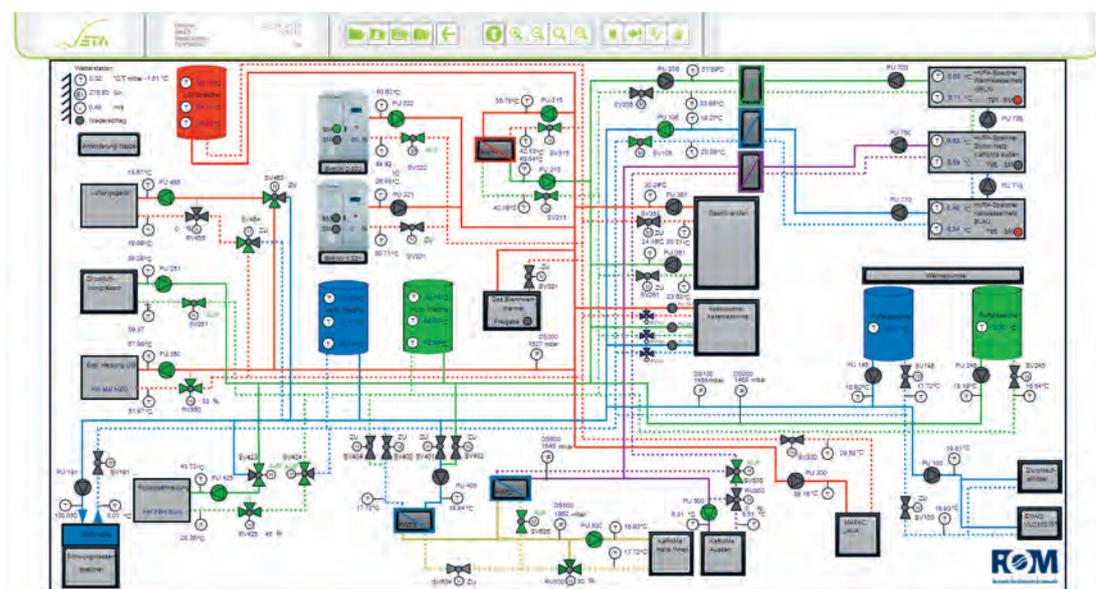
Das eigens für die ETA-Fabrik entwickelte Automations- und Regelungsprogramm regelt Ventile, Pumpen und Anlagen adäquat und steuert die Energieflüsse von der Quelle bis zur Senke. Die von den jeweiligen Verbrauchern angeforderten Exergieniveaus werden während der Programmlaufzeit durch die Anlagen dynamisch kommuniziert. Das Programm berechnet auf dieser Grundlage geeignete Sollwerte und regelbasierte Prioritäten für Erzeuger und Netze, die Energiewandler zu- und abschalten. Eine eigens entwickelte Schnittstelle ermöglicht über OPC-UA das sichere Überschreiben von Betriebsvorgaben durch externe Optimierer.

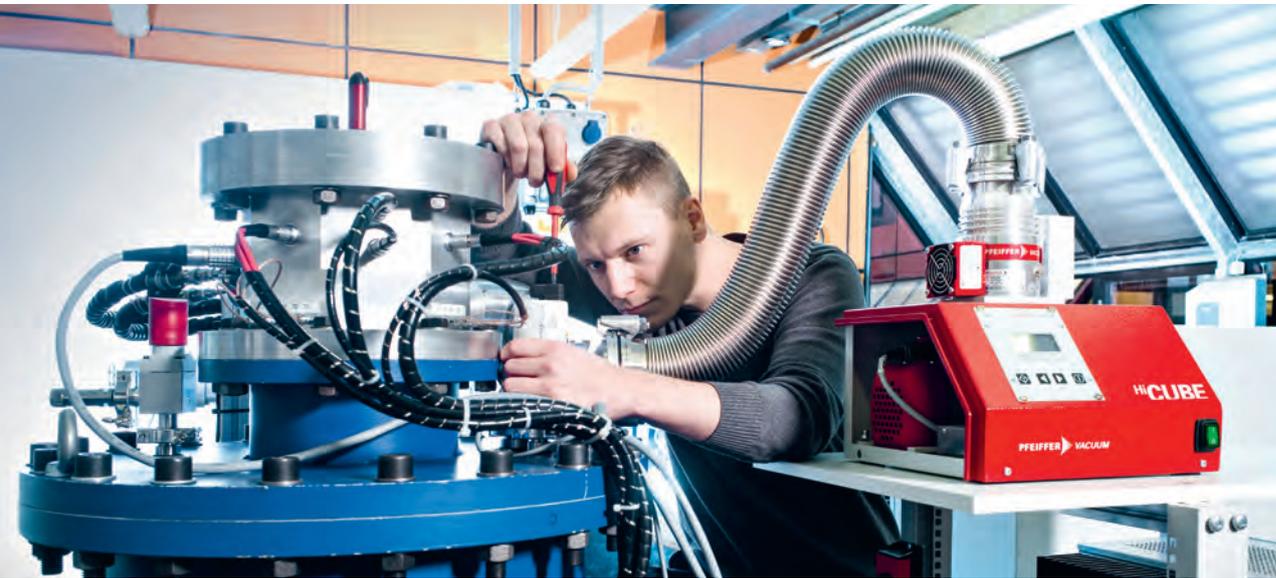
Für die Gebäudeleittechnik wurde eine webbasierte SCADA-Oberfläche geschaffen, um die Anlagen überwachen und manuell steuern zu können. Ferner glättet ein aktives Lastmanagement die elektrischen Lastspitzen des Maschinenparks. Dazu wurden verschiedene Optimierungsverfahren entwickelt, die Betriebsabläufe zeitlich verschieben und so Lastspitzen auf Komponenten- und Maschinenebene reduzieren.

Fazit und Ausblick

Das Optimieren von Energieflüssen in der Produktion ist ein zentraler Hebel, um Energiekosten zu reduzieren. Mit der ETA-Fabrik und der durchgehend informationstechnisch vernetzten Infrastruktur ist ein Industrie 4.0 Testfeld entstanden, an dem innovative Regel- und Optimierungsverfahren auf Komponenten-, Anlagen- und Systemebene erprobt werden können. Nachfolgeprojekte zielen darauf ab, wissenschaftlich aktuelle Optimierungsansätze zu entwickeln, um bei den Anlagen im Echtzeitbetrieb die Kosten zu optimieren. Dazu gehören eine modellbasierte prädiktive Regelung, die gemischte ganzzahlige Optimierung und verstärktes Lernen (Stichwort „Künstliche Intelligenz“).

16 Screenshot der webbasierten Gebäudeleittechnik-Oberfläche





17

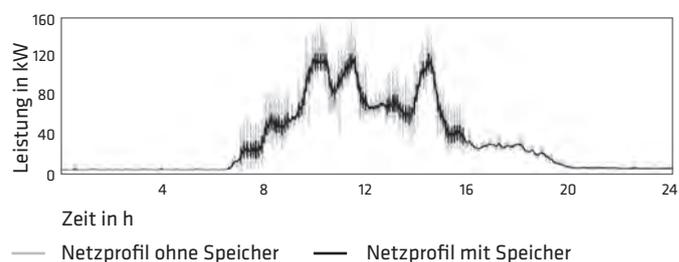
3.4 Kinetischer Energiespeicher

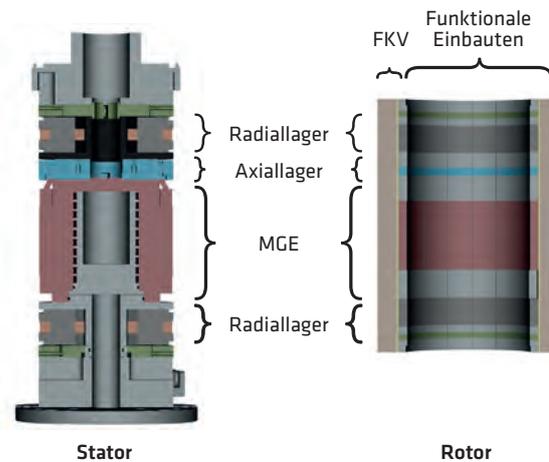
Kinetische Energiespeicher können elektrische Energie in der mechanischen Drehbewegung einer Schwungmasse speichern. Die Energiewandlung erfolgt über eine Motor-Generator-Einheit, die an die Schwungmasse angebunden ist und diese beim Laden beschleunigt oder zum Entladen abbremst. Der Speicher in der ETA-Fabrik wurde in der neuartigen Außenläuferbauform ausgeführt und dient dazu, den Lastgang zu glätten und die Anschlussleistung der Fabrik zu reduzieren (Abb. 18).

Bessere Auslastung der elektrischen Betriebsmittel und erhöhte Netzstabilität

Das Leistungsprofil von Prozessketten in der produzierenden Industrie setzt sich aus der Summe der Leistungsprofile der verschiedenen beteiligten Maschinen zusammen. Diese unterscheiden sich bei Prozesszeiten, Lastprofil und Spitzenleistungsaufnahme. In der Summe ergibt sich ein stochastisch zusammengesetztes Leistungsprofil. Durch den Umbau der Energieversorgung hin zu erneuerbaren Energiequellen mit fluktuierender Einspeisung in das elektrische Netz erhöht sich die Gefahr, dass das Stromnetz überlastet wird. Die energieeffiziente Fabrik als Bestandteil eines intelligenten Stromnetzes soll genau dem

18 Tageslastgang in einem Fertigungsbetrieb bei geglättetem Lastgang und reduzierter Anschlussleistung.





entgegenwirken. Als Folge können der Anteil der erneuerbaren Energien gesteigert und Reserven durch konventionelle Kraftwerke reduziert werden. Eine Effizienzsteigerung ergibt sich hier vornehmlich gesamtheitlich. Auf Fabrikebene lassen sich elektrische Betriebsmittel besser auslasten und kleiner dimensionieren. Ein kinetischer Energiespeicher trägt dazu bei indem er:

- die Netzurückwirkungen von Fertigungsanlagen durch eine Glättung des stochastischen Leistungsprofils reduziert und die notwendige Anschlussleistung verkleinert sowie
- die Netzfrequenz regelt und das Netz aktiv stabilisiert.

19 Schematischer Aufbau eines kinetischen Energiespeichers in Außenläuferbauform

Innovationen im Bereich der Energiespeicherung im industriellen Umfeld

Die neuartige Bauform des Außenläufers maximiert den Energieinhalt durch

- den Verzicht auf eine klassische Welle und Nabe,
- die Erhöhung der Radien und
- die Maximierung der Drehzahl, die ein Faser-Kunststoffverbund möglich macht.

Die als Hohlzylinder ausgeprägte Schwungmasse besitzt keine „tote“ Masse im Zentrum, was hohe Energiedichten zur Folge hat. Die berührungslose aktive Magnetlagerung erreicht im Einklang mit einem Betrieb im Vakuum hohe Leistungsdichten und Wirkungsgrade bei zugleich annähernder Wartungsfreiheit. Die Bauform (Abb. 19) ermöglicht eine einfache Skalierung, um den Speicher exakt an die Anwendung und die lokalen Bedingungen anzupassen. Gegenüber Batterien erweist sich der kinetische Energiespeicher wesentlich langlebiger, was wiederum sowohl die Anschaffungs- als auch die Betriebskosten reduziert.

Funktionalitäten des kinetischen Energiespeichers

Hauptmerkmal des kinetischen Energiespeichers in der ETA-Fabrik ist die Lastgangglättung und die reduzierte Anschlussleistung – beides trägt dazu bei, die Netzurückwirkungen der Fabrik zu reduzieren und die Effizienz auf Stromnetzebene zu steigern. Wird die Funktionalität bei der Planung des fabrikinternen Microgrids mit einbezogen, können z.B. Netzanschlusstransformatoren kleiner ausfallen und deren Effizienz durch eine konstante Auslastung gesteigert werden.

Ebenso relevant ist die dynamische Netzstabilisierung mittels Frequenzregelung. Hier fungiert die effiziente Fabrik über den Energiespeicher als aktiver Verbraucher. Konventionelle Kraftwerke müssen somit weniger Reserven vorhalten und können viel effizienter betrieben werden. Daneben erhöht der kinetische Energiespeicher die Netzqualität des Microgrids und ermöglicht einen Inselbetrieb bei Netzausfall. Das vermeidet Produktionsausfälle und verhindert Sachschäden an Anlagen. ■

4.0 Innovative Schale, effizienter Kern

Autoren:

Andreas Maier, Jens Schneider
ISM+D, TU Darmstadt

Mitarbeit:
Albrecht Gilka Bötzwow
WiB, TU Darmstadt

Dietz-Joppien Architekten

Anna Scheuermann, OSD

Alexander Wien

Harald Garrecht
Universität Stuttgart

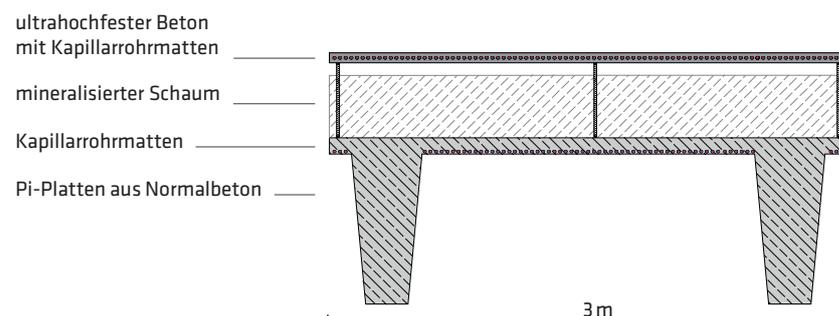
4.1 Die energieoptimierte Gebäudehülle als Bestandteil der Prozesskette

Eine Vernetzung von Gebäude und Produktion eröffnet die Chance, überschüssige thermische Energie aus den Maschinenprozessen zur Klimatisierung des Gebäudes zu nutzen, indem man die inneren und äußeren Oberflächen der Gebäudehülle dafür aktiviert. Diese fungieren entsprechend den grundlegenden Szenarien (vgl. Kap. 3.1) als große Heiz- und Kühlflächen. Um die maschinell verursachte Abwärme weiterzuverwenden oder kontrolliert abzuführen, bedarf es spezieller Hüllelemente im Dach- und Wandbereich, die hoch dynamisch thermisch aktiviert werden können.

Konstruktionsmerkmale der Gebäudehülle aus Beton

Die massive Hülle der ETA-Fabrik ist im Dach- und Wandbereich modular aus Betonfertigteilen gefügt und wie die meisten Industriebauten flexibel und doch einheitlich konstruiert. Der regional verfügbare Verbundbaustoff Beton ist für die thermische Aktivierung besonders geeignet. Je nach Konstruktionsdicke bewährt er sich als guter Wärmeleiter ebenso wie als träger Wärmespeicher:

- Der thermisch aktivierte Beton ermöglicht eine rasche Übertragung der Strahlungswärme und
- seine träge Masse garantiert im passiven Fall in Kombination mit einer Wärmedämmung ein angenehmes Raumklima.



01 Konstruktiver Aufbau der thermisch aktivierten Gebäudehüllelemente aus Beton im Dach- und Wandbereich.



Darüber hinaus ist Beton sehr flexibel formbar und lässt sich sowohl vor Ort als auch werkseitig sehr gut verarbeiten. Er ist im Gegensatz zu anderen Baustoffen nicht brennbar, weshalb keine weitere brandschutztechnische Vorsorge konstruktiver Art ergriffen werden muss. Eine Besonderheit ist die Kombination mit einem an der Modellfabrik erstmalig verwendeten zementgebundenem (Beton-)Schaum, was einen nahezu sortenreinen Aufbau der Gebäudehülle ermöglicht (Abb. 01).

Die jeweils drei Meter breiten Fertigbetonteile an Wand und Dach (Abb. 02) sind 10 bzw. 20 m lang und raumseitig als statisch wirksame Pi-Platten ausgeformt. Nahe der Innenoberfläche sind in die lediglich 12 cm schlanken Elementspiegel kapillarähnliche Rohrleitungen aus Polypropylen integriert (Abb. 03).

Auf die Außenseite der Pi-Platten wurde werkseitig unmittelbar nach erfolgter Betonage der ultraleichte mineralisierte Schaum als Dämmung (mittlere Wärmeleitfähigkeit 0,06 W/mK) in Dicken von 30 bis 40 cm aufgebracht.

Eine besondere Herausforderung war es, den Bindemittel-leim zur Schaumstabilisierung im Rahmen eines komplett neu entwickelten semikontinuierlichen Verfahrens herzustellen (Abb. 04). Da der Zement seine Festigkeit hydratisierend ausbildet, brauchte es weder für die werkseitige noch für die baustellenseitige Herstellung eine Autoklavierung.

02 Südostansicht der ETA-Fabrik

03 Lage der kapillarähnlichen Rohrleitungen im Stahlbetonfertigteile unterhalb der äußersten Bewehrungslage kurz vor der Betonage.





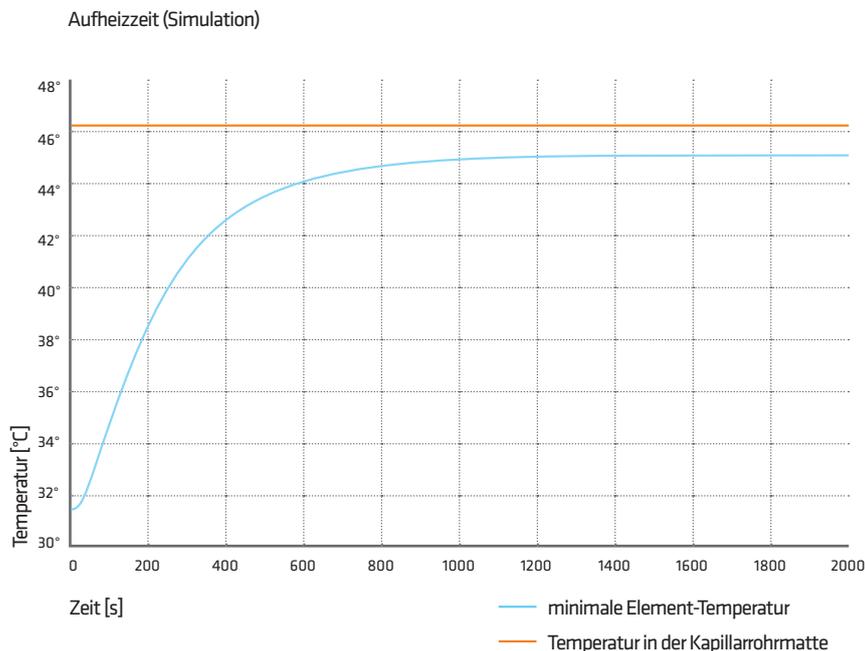
04 Herstellungsprozess von mineralisiertem Schaum im semikontinuierlichen Verfahren.

Den äußeren Abschluss bilden lediglich 55 mm dünne, aber mechanisch hoch beanspruchbare Fassaden- bzw. Dachplatten aus mikrobewehrtem ultrahochfestem Beton. Diese Elemente vereinen somit die Funktionen des Tragens, des Dämmens, des Begrenzens sowie des thermischen Interagierens und reduzieren daher Schnittstellen und somit Fehlerquellen.

Thermische Leistungsfähigkeit der Gebäudehülle

Das Konzept der ETA-Fabrik ist darauf ausgerichtet, dass Gebäudehülle und Produktionsprozesse interagieren, um auf eine konventionelle, elektrisch angetriebene Raumluftkonditionierung ebenso verzichten zu können wie auf die isolierte Kühlung der Komponenten infolge energieintensiver Produktionsprozesse. Um dies zu erreichen müssen die entsprechenden gebäudeseitigen Prozesse schnell vonstattengehen. Diese Anforderung kann eine konventionelle Betonkernaktivierung nicht erfüllen, da sie die thermische Speichermasse der Bauteile nutzt und somit phasenversetzt arbeitet. Genau an diesem Punkt setzt die oberflächennahe Aktivierung der Gebäudehüllelemente in Kombination mit sehr geringen Materialdicken an: Dieses Wirkprinzip ermöglicht eine hohe thermische Reaktivität der Bauteile sowie eine

05 Elementtemperaturentwicklung über die Zeit bei gegebener Vorlauftemperatur der Kapillarrohrmatten.

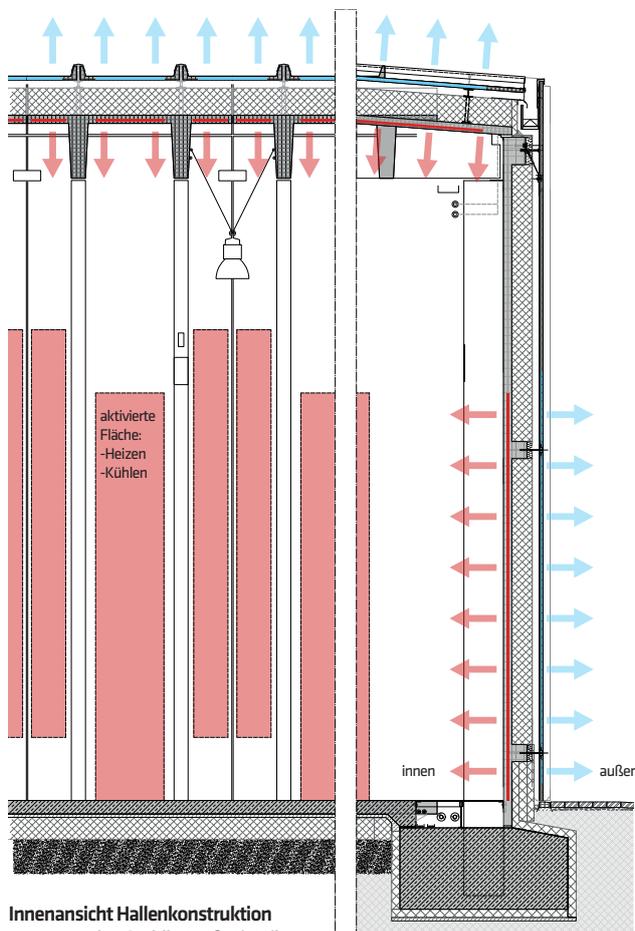


nahezu gleichmäßige Temperaturverteilung in den Querschnitten der äußeren Gebäudehülle. Es ist zum Beispiel möglich, die Temperatur innerhalb des Fassadenquerschnitts gleichmäßig von 30 °C auf 45 °C binnen etwa 20 Minuten anzuheben (Abb. 05). Die Durchflussgeschwindigkeit des Wasser-Glykolgemisch in dem kapillarähnlichen Rohrleitungsnetz liegt bei 0,5 m/s.

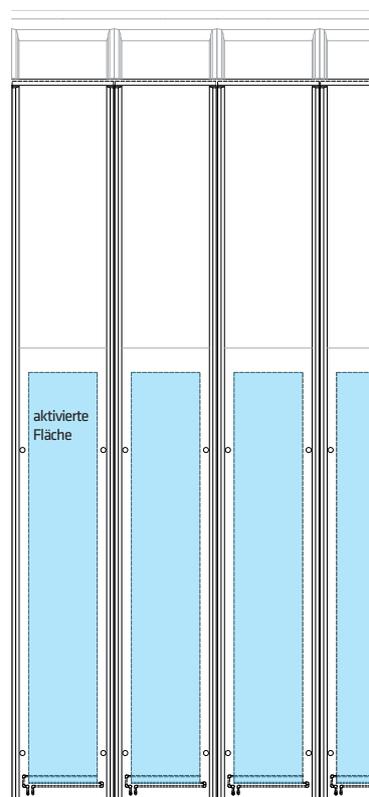
Trotz rascher Aktivierungsprozesse ergeben sich somit im stationären Zustand Heizleistungen von 75 bis 95 W/m² in den Dach- und Wandflächen (Abb. 06, 07). Die Kühlleistungen erreichen 92 bis 62 W/m², wobei die Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur jeweils lediglich 2 K beträgt. Bei der statischen Berechnung sind die Lastfälle, die sich aus den Temperaturbeanspruchungen der Bauteilaktivierung ergeben, unbedingt zu berücksichtigen. Aufgrund des statischen Konzepts ergaben sich aus den Temperaturdifferenzen nur geringe Zwängungen, dafür jedoch relative Verformungen zwischen den Bauteilen. Diese Bewegungen nehmen die konstruktiv entsprechend ausgebildeten Anschlüsse und Fugen auf.



06



Innenansicht Hallenkonstruktion
aus tragenden Stahlbetonfertigteilen
mit eingelegten Kapillarrohmatten
und Mineralschaumdämmung



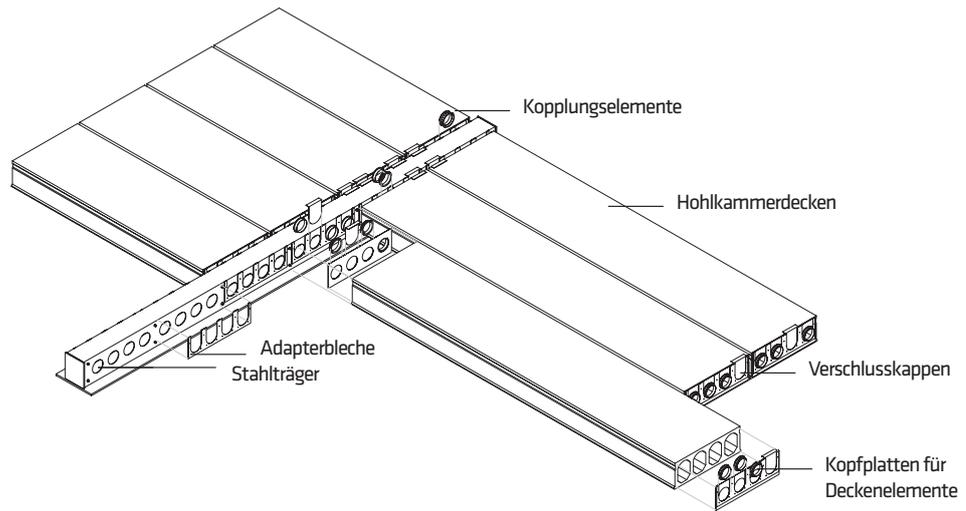
Außenfassade Ducon mit eingelegten
Kapillarrohmatten zur Wärmeabgabe (Sommer);
vorgehängte Fertigteilfassade aus
mikrobewehrtem ultrahochfestem Beton

06 Fassadenplatten aus
mikrobewehrtem, ultra-
hochfestem Beton (mrUHPC).

07 Die beiden Details zeigen
die thermisch aktivierten
Wand- und Dachelemente.

07

08 Systemkomponenten des Flachdeckensystems mit integriertem Luftkanalnetz



4.2 Energetische Integration von Lüftungsdecken und Glasfassaden in die ETA-Fabrik

Die energetische Effizienz lässt sich verbessern, indem man entweder bei gleichem Energieaufwand einen erhöhten Nutzen erzielt oder bei gleichem Produktionsergebnis den Energieeintrag reduziert. Bei der ETA-Fabrik finden sich beide Ansätze: Einmal durch den Einbau von Glasfassaden mit eingebauten Lamellen zur Tageslichtlenkung sowie durch die Nutzung von statisch optimierten Hohlkammerdecken als Lüftungssystem.

Spannbeton-Hohldielen als integrierte Lüftungsdecke

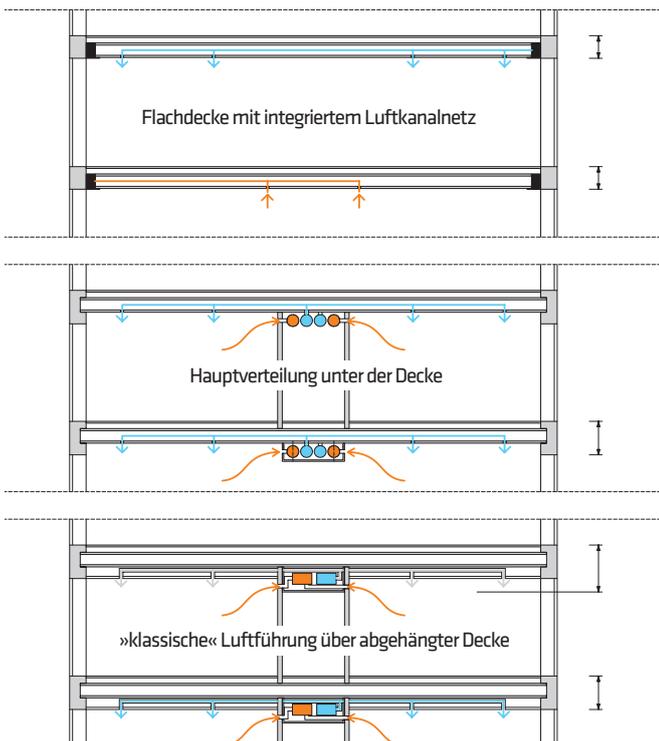
Die mechanische Belüftung von gedämmten Räumen erfordert in der Regel ein Luftkanalnetz, das zumeist unterhalb der Geschossdecken montiert wird und entsprechend viel Platz benötigt. Nutzt man die Hohlräume in Spannbeton-Fertigdecken in Verbindung mit luftführenden Stahlhohlprofilen, ergibt sich eine funktionale Synergie des Bauteils, bei der auch die thermische Speicher Masse der Betondecke über die temperierte Zuluft aktiviert wird.

Im Produktionsgebäude wird der für Lehr- und Fortbildungsveranstaltungen vorgesehene Seminarraum mit Frischluft über Bohrungen an der Unterseite der Hohlkammerdielen durch angepasste Verbindungen zwischen den stählernen Randträgern und den Hohlräumen der Flachdecken versorgt (Abb. 08).

Durch die mehrfache Nutzung vorhandener Bauteile entstehen wirtschaftliche Vorteile gegenüber einer konventionellen Bauweise, wenn dadurch Ausbaurbeiten entfallen, Geschosshöhen reduziert werden können und sich so die Bauzeit verkürzt. Bei der ETA-Fabrik ist das Luftkanalnetz vollständig in die Konstruktionshöhe der Decke integriert; Tragwerk und Lüftungssystem werden zu einer Einheit und aufwendige Installationen unterhalb der tragenden Deckenplatten entfallen (Abb. 09).

Die besonderen Anforderungen des baulichen Brandschutzes an luftgeführte, tragende Bauteile erfüllen spezielle Luftauslässe, die sich im Brandfall selbstständig schließen.

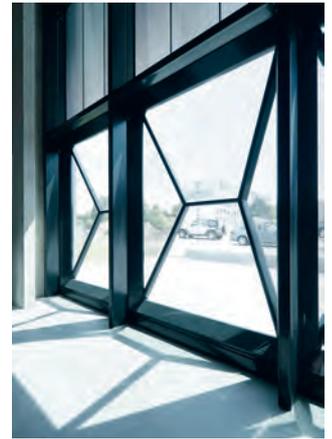
09 Verschiedene Lüftungssysteme unter Flachdecken



Glasfassaden zur Tageslichtsteuerung

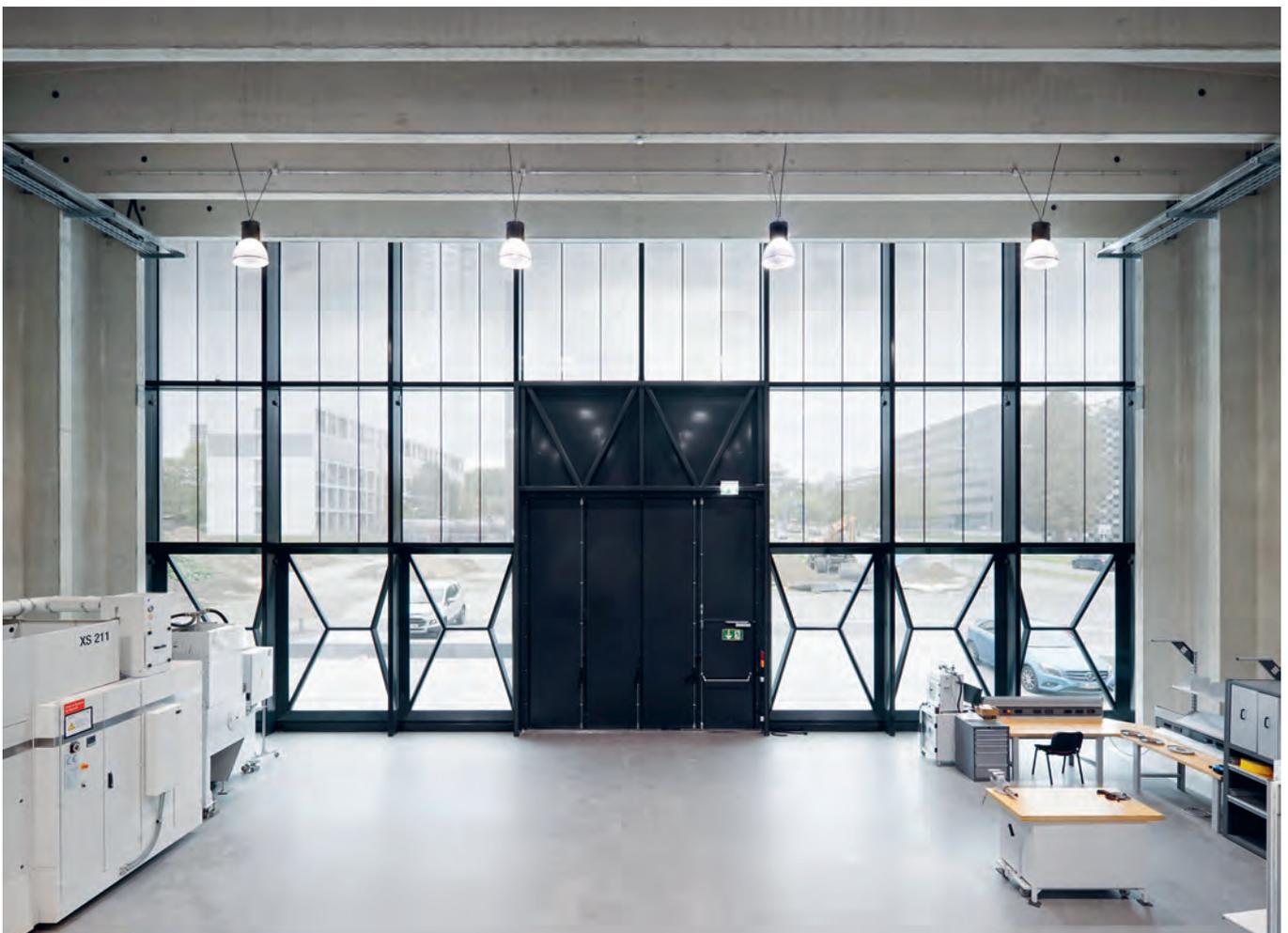
Das Beleuchtungskonzept der ETA-Fabrik ist darauf ausgerichtet, das Tageslicht bestmöglich auszunutzen und so den Kunstlichtbedarf auf das absolut notwendige Maß zu reduzieren. Dies wird durch die Kombination aus tageslichtabhängig gesteuerten, dimmbaren LED-Leuchten in der Produktionshalle und richtungsselektiven Lamellen im Scheibenzwischenraum der Isolierverglasung der Südfassade erreicht. Letztere reduzieren außerdem den Eintrag langwelliger Solarstrahlung. Diese würde sowohl das Raumklima zusätzlich zur Maschinenabwärme negativ beeinflussen, als auch zu temperaturinduzierten Verformungen der Produktionsmaschinen und deren Antriebe führen. Die Lamellen lenken das Sonnenlicht zur Hallendecke und damit – je nach Sonnenstand – weit in das Gebäude hinein.

Besonders markant sind die parametrisch auskragenden Fassadenelemente im unteren Drittel der Südfassade (Abb.10) beidseits der Toranlage mit vorgelagerter Anlieferzone. Diese vollständig geklebten und siebbedruckten Stufen- gläser ersetzen an der Stelle die sonst flächen- bündige Verglasung.



10 Die südliche Elementfassade mit lichtlenkenden Lamellen im Scheibenzwischenraum der 2fach-Isolierverglasung (oben) und den parametrischen Fassadenelementen (unten).

11 Zweigeteilte Elementfassade mit integrierter Toranlage





12

12 Nordfassade mit transparenter Festverglasung und opaken Senk-Klapp-Öffnungsflügeln mit Vakuumisoliereinlage

13 Innenansicht des Seminarraums mit der Lüftungsdecke aus Spannbetonhohlblechen



13

Die Neigung der Scheiben ist standortspezifisch an den Sonnenverlauf des Nord-Süd ausgerichteten Gebäudes angepasst. Die seitlichen Dreieckscheiben sowie die mittlere obere Trapezscheibe gewährleisten den Sonnenschutz. Die mittlere untere Trapezscheibe ist hingegen vollkommen transparent und erlaubt somit den Ausblick auf das Forschungsfeld und den umliegenden Campus (Abb. 11).

Die beiden Giebfassaden sind hinsichtlich der Fugen und Anschlüsse konstruktiv an die Randbedingung der thermisch aktivierten Dach- und Längsfassade angepasst. An den verglasten Ost- und Westfassaden sorgt ein im Scheibenzwischenraum integriertes, transluzentes Kapillarsystem für eine gleichmäßig diffuse Lichtstreuung in das Gebäude.

Nach Norden, im Bereich der Büros, konfiguriert sich die Fassade in Structural-Glazing-Optik als Pfosten-Riegel-Fassade. Um den Wärmeschutz der Fassade zu optimieren, sind in die Scheibenzwischenräume der opaken Öffnungselemente vliesbelegte Vakuumisolierelemente eingelegt. Der U_g -Wert dieser Elemente beträgt lediglich $0,23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Zum Vergleich: Die transparente 2fach-Verglasung kommt auf einen U_g -Wert von $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (Abb. 12).



14

14 Südansicht der ETA-Fabrik mit den markanten parametrischen Glaselementen und der Anlieferzone.

15 Der Zugang zur ETA-Fabrik erfolgt von Norden und führt vom Eingangsbereich in den Bürotrakt.



15

4.3 Gestaltung

Die ETA-Fabrik verfolgt einen ganzheitlichen Planungsansatz durch synergetische Betrachtung der Teilsysteme Maschine, Gebäudetechnik und Bauwerk. Der im Rahmen des Projektes verfolgte Entwurfsansatz für den Industriebau entwickelt Gestalt, Funktion, Konstruktion und Gebäudehülle von innen nach außen. Mensch und Maschine definieren die Anforderungen an die energieeffiziente Fabrik der Zukunft – und nicht umgekehrt.

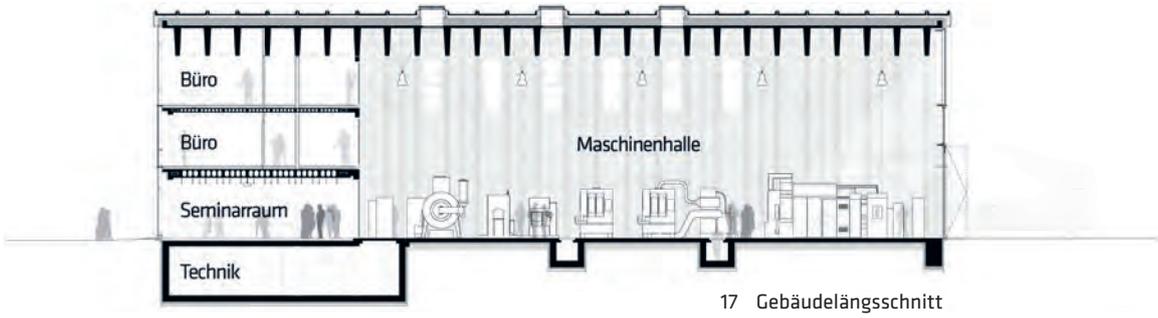
Gestaltung und Funktion des Maschinenhauses

Die Modellfabrik präsentiert sich prominent am Eingang zum Campus Lichtwiese in unmittelbarer Nachbarschaft zu dem bereits bestehenden Blockheizkraftwerk, das ebenfalls dem Thema „Energie“ gewidmet ist. Der in Nord-Süd-Richtung linear ausgerichtete Baukörper ist 40 m lang und 20 m breit (Abb. 18).

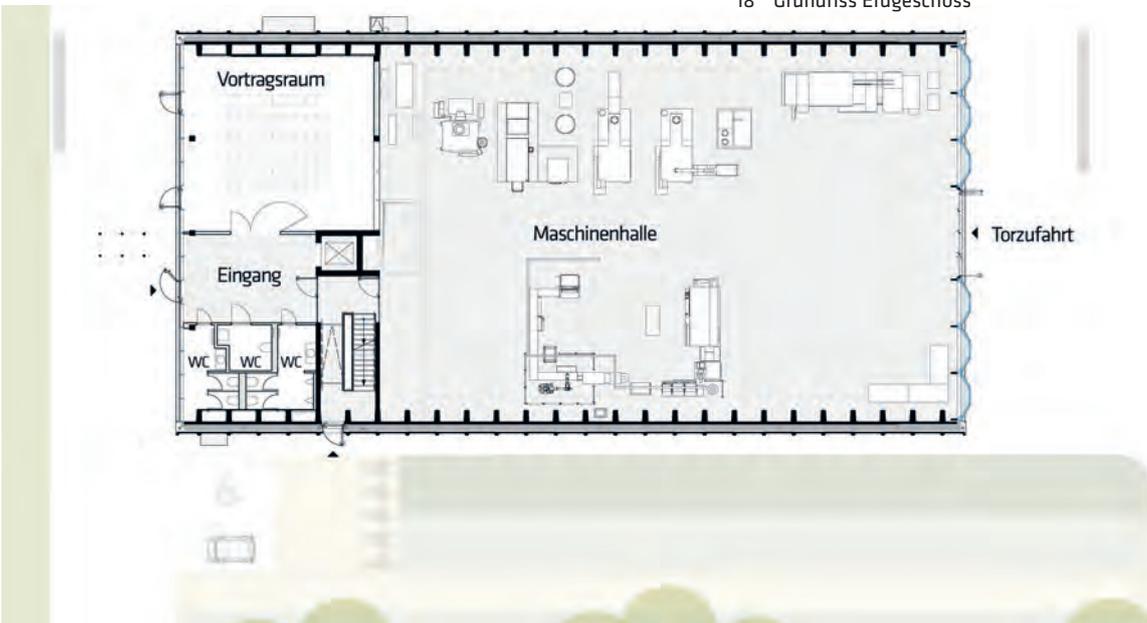
Erschlossen wird das Gebäude von der Nordseite her – von hier aus erfolgt der Zugang zu dem dreigeschossigen Bürobereich mit Seminar- und Besprechungsräumen sowie den Technikräumen im Untergeschoss. Den südlichen, rund 550 m² großen Gebäudeteil nimmt der 11 m hohe Hallen- bzw. Produktionsbereich ein (Abb. 16, 17).

Längsseitig begrenzt die thermisch aktivierte, massive Hüllkonstruktion rahmenartig den

45



18 Grundriss Erdgeschoss





19



20

Baukörper. Die einheitlich gestalteten Stahlbetonfertigelemente erstrecken sich von der Wand über das Dach hinweg. An den nördlichen und südlichen Stirnseiten begrenzen die Ganzglasfassaden die schlichte Kubatur und gewährleisten Transparenz mit spannungsvollen Ein- und Ausblicken.

Nur einer der vier Energiespeicher ist oberirdisch dem Gebäude vorgelagert – der externe Vakuumspeicher auf Hochtemperaturniveau steht vor der Fassade an der Gebäudeostseite. Die anderen drei Speicher für niedriges und mittleres Temperaturniveau sind als erdberührte Betonbehälter nicht sichtbar (Abb. 16). Eine auf dem Dach installierte Berieselungsanlage unterstützt die Wärmeabfuhr über die Gebäudehülle. Sie wird von einer Regenwasserzisterne auf der nordwestlichen Gebäudeecke gespeist.

19 Rendering mit Blick auf die Nordfassade als Vision zum Projektstart ...

20 ... und das umgesetzte Ergebnis aus dem gleichen Blickwinkel zum Zeitpunkt der Fabrikeröffnung.

21 Ein schlichter und funktionaler Baukörper, dessen südliche Glasfassade von den parametrischen Glaselementen geprägt wird.



	mineralisierter Schaum	EPS	XPS
λ [W/(mK)]	0,06	0,035	0,035
d_{eff} [m]	0,250	0,146	0,146
GWP [kg CO ₂ -Äqv./m ² Dämmmaterial]	31,23	6,84	8,68
PE _e [MJ/m ² Dämmmaterial]	15,19	3,60	3,11
PE _{ne} [MJ/m ² Dämmmaterial]	90,40	196,88	263,96
PE _{ges} [MJ/m ² Dämmmaterial]	105,59	200,48	267,06

22 Vergleich mineralisierter Schaum mit EPS- und XPS. Das Recyclingpotential des Schaumbetons ist hierbei noch nicht berücksichtigt.

Das bauliche Konzept schließt auch die Frage des Rückbaus mit ein, der sehr gut gelöst ist, da fast ausschließlich zementöse Baustoffe verwendet worden sind. Die einzelnen Schichten können problemlos wieder getrennt und aufgrund ihrer mineralischen Zusammensetzung gut recycelt werden. Die Ökobilanz des neu entwickelten Schaumbetons hat gegenüber herkömmlichen, organischen Dämmmaterialien erhebliche Vorteile. So weist mineralisierter Schaum bei einer Gesamtdicke von 25 cm einen Primärenergiebedarf von 106 MJ / m² auf. XPS hingegen benötigt für die Rohstoffgewinnung bis zum Einbau auf der Baustelle bei vergleichbarer Dämmwirkung 267 MJ / m² (Abb. 22).

23 Südwestecke mit thermisch aktivierter Betonhülle und transparenter Elementfassade





24

Planung im Spannungsfeld von Maschinenbauern und Maschinenhausbauern

Innovationen entstehen häufig an den Schnittstellen der Fachdisziplinen. Ohne die Bereitschaft zur interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen Maschinenbauern, Bauingenieuren und Architekten können derartig komplexe Aufgaben nicht erfolgreich bearbeitet werden. Auch wenn Energie- und Ressourceneffizienz im System mit den Maschinen, der neuartigen, energetisch aktivierbaren Gebäudestruktur und Gebäuhülle und den thermischen und elektrischen Energiespeichern im Vordergrund stehen, tragen viele kleine Details zur Arbeitsplatzqualität und Kommunikation in einer Fabrik bei. Dies müssen sich alle Fachingenieure immer wieder aufs Neue bewusst machen.

Die in sehr kurzer Zeit umgesetzten Innovationen waren nur möglich, weil das gesamte Forschungs- und Planungsteam mit den vielen Partnern aus Baubranche, Industrie, Fördergebern und der Bauherrenschaft transparent und ergebnisoffen zusammengearbeitet hat. Wollen wir die Herausforderungen der Zukunft meistern, müssen die Grenzen der Fachdisziplinen noch weiter ineinander fließen. ■

24 Die elf Meter hohe Maschinenhalle mit thermisch aktivierter Betonfassade.

25 Die Materialien Glas und Beton dominieren den Bürotrakt.

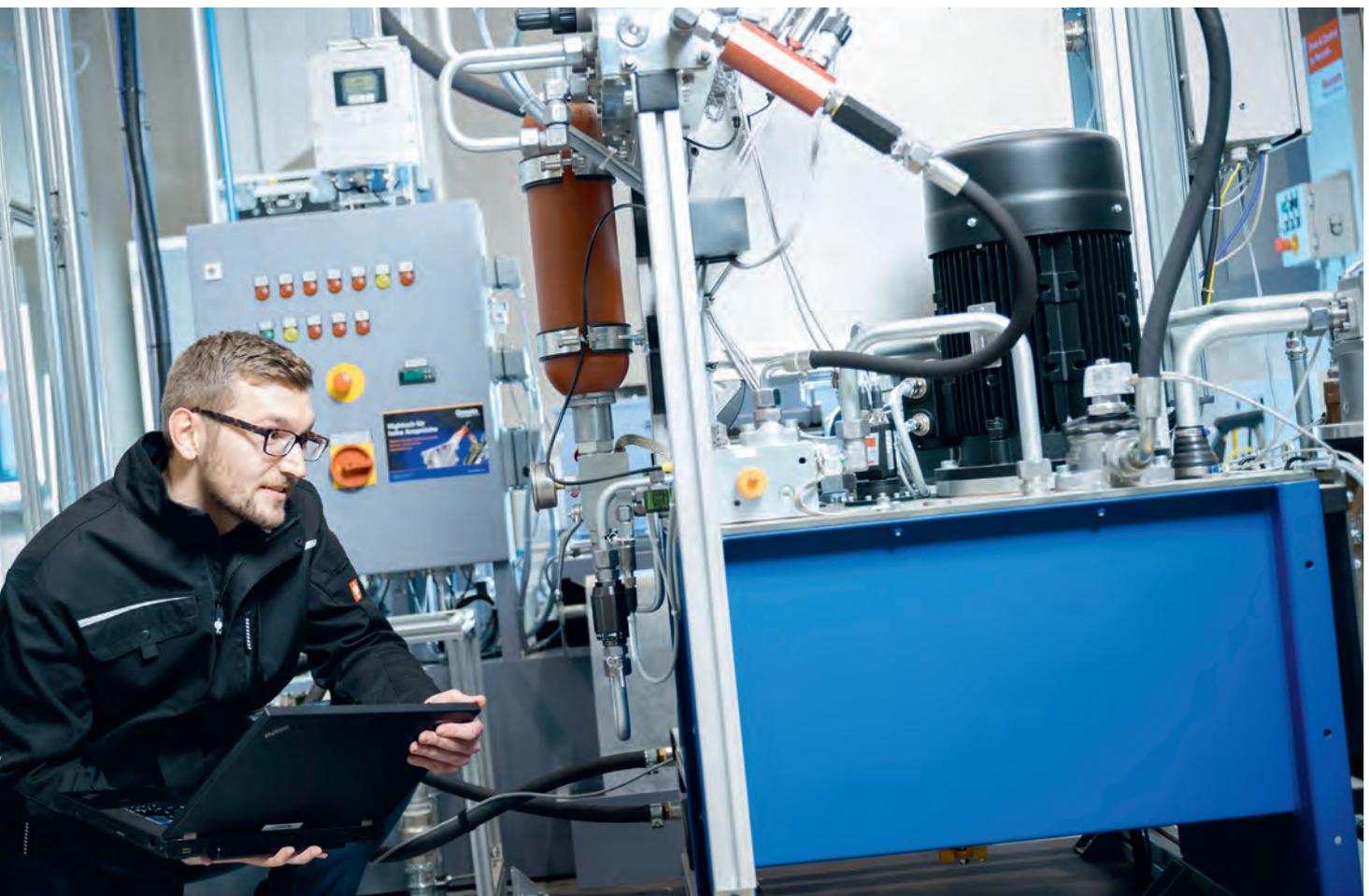


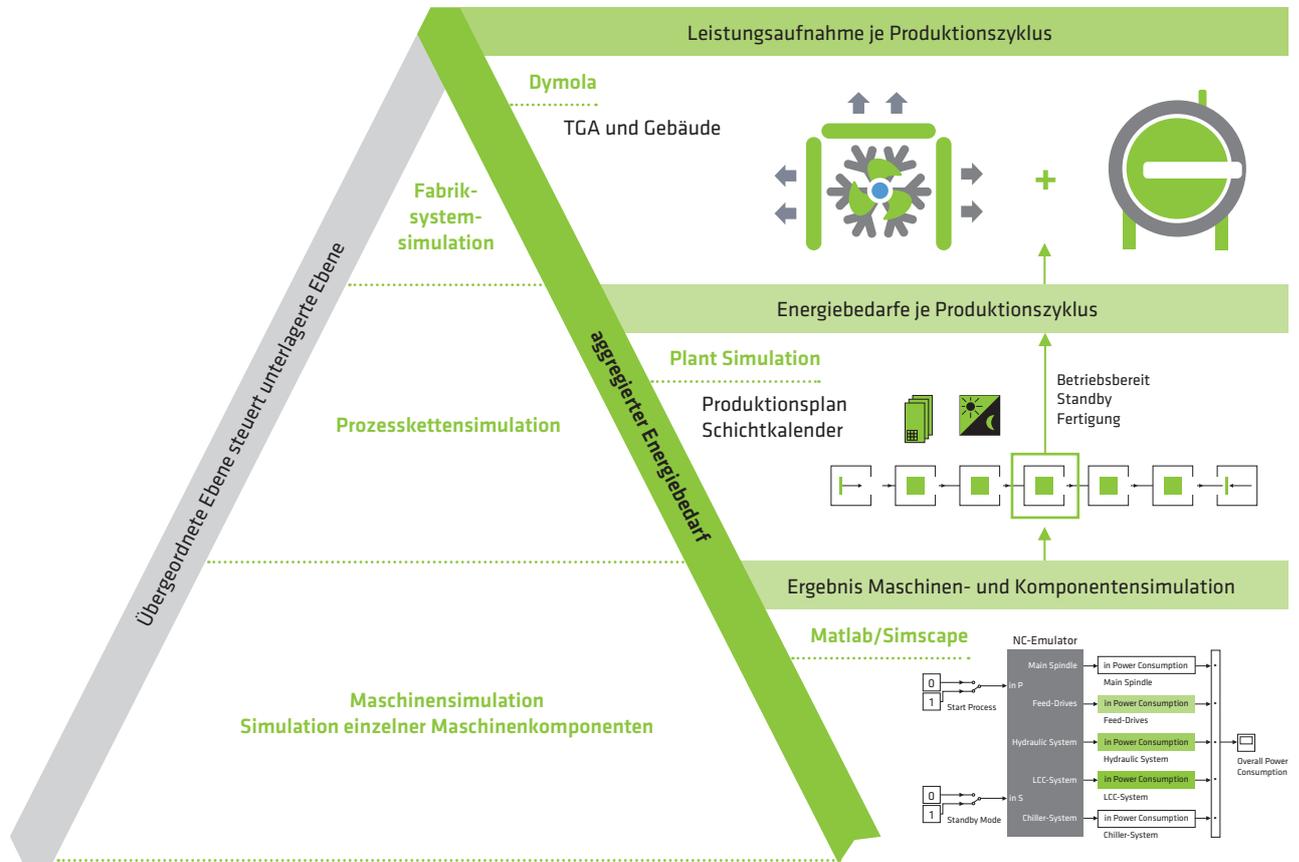
25

5.0 Die virtuelle energieeffiziente Fabrik

Neben der praktischen Forschung am „physischen Objekt“ bildet das digitale Modell der ETA-Fabrik einen ebenso elementaren Grundstein der Arbeiten im Projekt. So bündelt die „virtuelle energieeffiziente Fabrik“ alle wesentlichen Erkenntnisse und ermöglicht den Erkenntnistransfer auf ähnlich geartete Problemstellungen. Die computergestützte Simulation ist ein Werkzeug, das im Einklang mit der kontinuierlich steigenden Leistung der Rechner- und Softwaresysteme eine immer wichtigere Rolle spielt.

Sie ermöglicht die Analyse komplexer dynamischer Systeme ohne die direkte physische Einflussnahme. So können beispielsweise Regelstrategien, Systemauslegungen und Systemabläufe risikofrei und ohne den direkten Zugriff auf das physische System virtuell erarbeitet und erprobt werden.





02 Simulative Abbildung von der Komponente bis zum Fabriksystem

5.1 Informationsgewinn durch Simulation

Studien und Forschungsprojekte belegen erhebliche wirtschaftlich erschließbare und technisch lösbare Energieeffizienzpotenziale in der deutschen Industrie, die jedoch bislang nicht gehoben werden. Mögliche Ursachen für diese beständige »Energieeffizienzlücke« liegen im Marktversagen und in organisatorischen Schwächen. Oft fehlt es aber auch nur an der Bewertung des wirtschaftlichen Potenzials. Kurz gesprochen sind Unternehmen vielfach nicht in der Lage, für die zahlreichen Energieeffizienzmaßnahmen das abgeleitete Kosteneinsparpotenzial zu quantifizieren und mögliche Implikationen zu identifizieren, bzw. sie scheuen den entsprechenden Identifikationsaufwand. Es fehlen also standardisierte Werkzeuge für Unternehmen, um die nötige Transparenz zu schaffen, die erforderlich wäre, um die Effizienzlücke anhand fundierter Daten zu schließen. Ein Werkzeug hierfür kann die Bewertung des Energiebedarfs von energetischen Systemen (Maschinen, Anlagen und Gebäude) mittels Simulation sein. Diese kann gerade in der Planungsphase, wenn Informationen besonders gefragt sind, aber messtechnisch nicht erhoben werden können, entscheidende Hinweise zur Konzeptfindung geben.

Autoren:

Dominik Flum, Philipp Schraml
PTW, TU Darmstadt

Andreas Maier
ISM+D, TU Darmstadt

5.2 Von der Komponente zum Fabrikssystem

Im Laufe des Forschungsprojektes ist es gelungen, Simulationslösungen bzw. -werkzeuge für die relevanten Zielgruppen zu entwickeln. Es wurden verschiedene Simulationsumgebungen verwendet, um die jeweiligen Anforderungen zu erfüllen.

Maschinen und Prozesskette

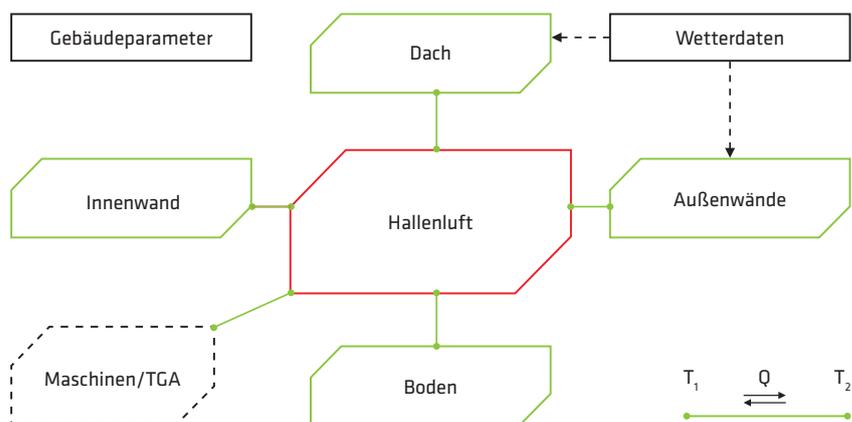
Bei Maschinen und deren Komponenten bedarf es detaillierter Kenntnisse über das Betriebsverhalten, um Optimierungen in der Energieeffizienz analysieren zu können. Dazu wurden kontinuierliche Simulationsmodelle mit der Software MATLAB / SIMULINK erstellt. Diese ermöglichten unter energetischen Gesichtspunkten die Konfiguration von Maschinen sowie die Dimensionierung der Komponenten.

Da es sich bei der Produktionsprozesskette in der ETA-Fabrik um eine sogenannte diskrete Fertigung handelt (Fertigung einzelner, zählbarer Gegenstände), war es naheliegend, diese auch in einer diskreten Simulationsumgebung abzubilden. Eine vor allem in der Automobilindustrie bewährte Simulationsumgebung ist PLANT SIMULATION. Indem man die Ergebnisse der Maschinensimulation integriert, kann man den maschinenzustandsabhängigen Energiebedarf in die gängigen Produktionsplanungsabläufe einfließen lassen. Der Anwender im produzierenden Unternehmen benötigt somit keine eigens dafür anzuschaffende „Spezialsoftware“ mehr (Abb. 02).

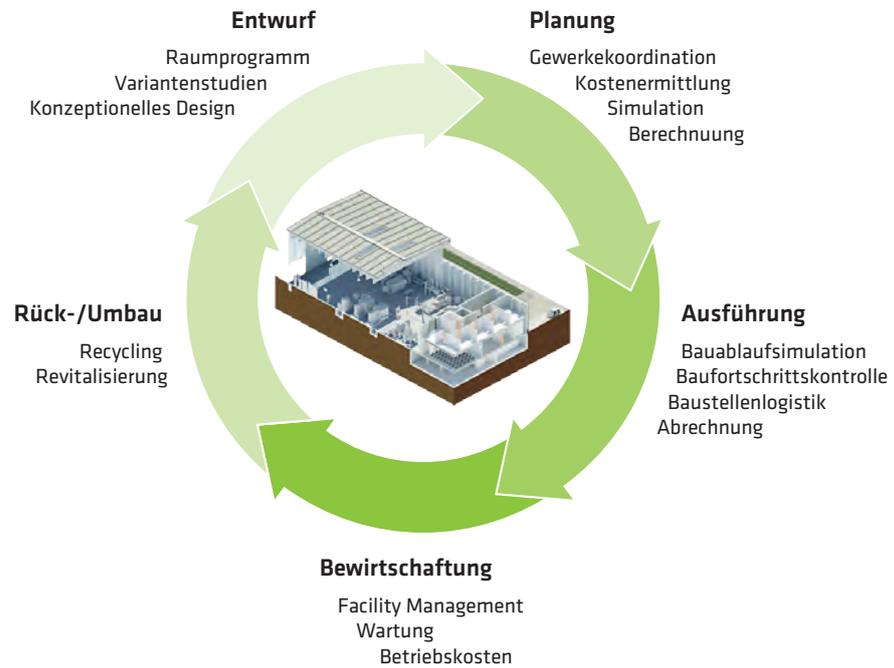
Thermisch-hydraulische Systeminteraktion

Für die Abbildung der Produktionsinfrastruktur, die in der ETA-Fabrik im Wesentlichen auf die thermische Vernetzung fokussiert ist, wurde das thermisch-hydraulische System der ETA-Fabrik von den Projektpartnern in DYMOLA abgebildet: es umfasst die Produktionsmaschinen, die TGA und die thermisch interagierende Gebäudestruktur.

Das Zentrum des Gebäudemodells ist ein Hallenluftmodell zur Simulation der thermischen Gegebenheiten in der Produktionshalle (Abb. 03). An dieses sind die Modelle der Gebäudestruktur angeschlossen. Das Gebäudemodell bildet mit den Maschinen- und TGA-Modellen das Gesamtmodell der ETA-Fabrik. Die thermischen Randbedingungen hierfür werden aus Echtzeitwetterdaten parametrisiert. Mit dem



03 Gebäudemodell - schematische Darstellung



Gesamtmodell können einerseits Betriebsstrategien für bestehende Anlagen geplant werden. Andererseits lassen sich damit auch Fragstellungen zur Auslegung für den Transfer in zukünftige Anwendungsfälle in Simulationsversuchen verifizieren, ohne dass die Sicherheit des realen Systems gefährdet wird.

04 Mögliche Teilprozesse, abgebildet in einem BIM-Modell

Datenmanagement der Gebäudeinfrastruktur

Die klassische 2D- oder 3D-Planung von Bauwerken erfolgt zu- meist anhand virtueller Architekturmodelle, deren Informations-



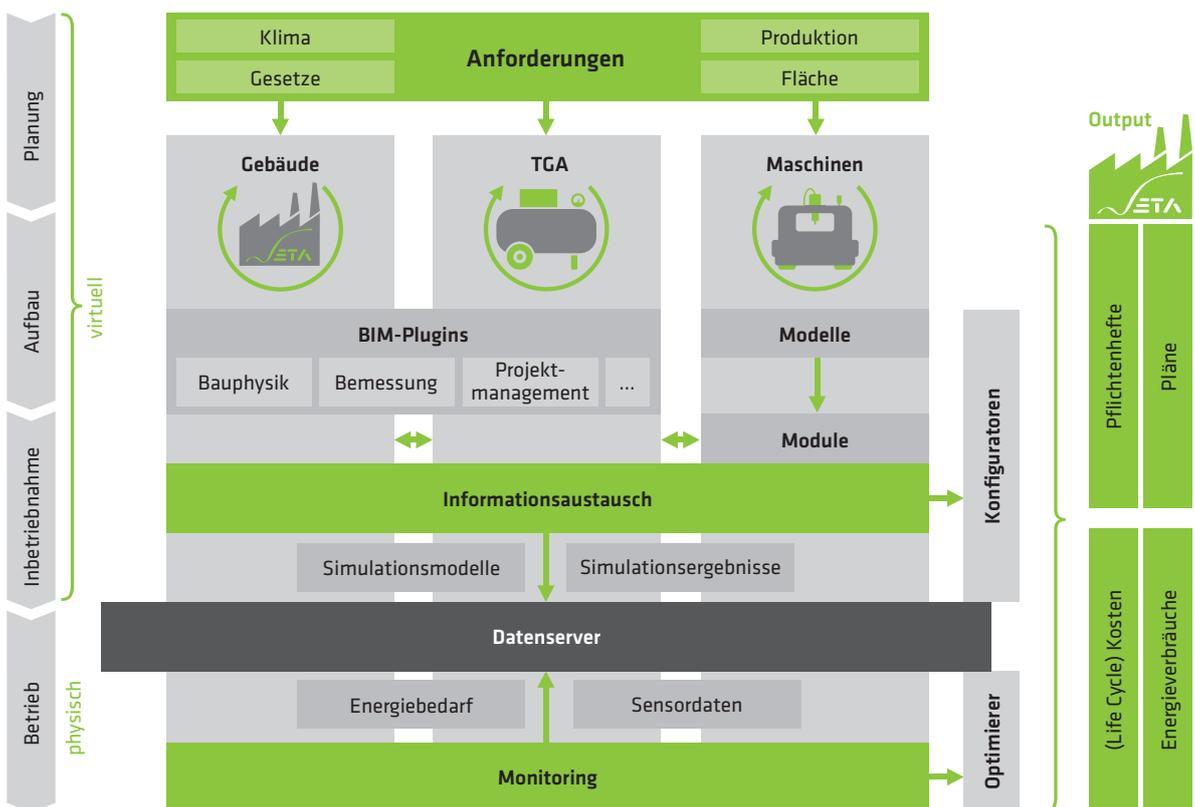
gehalt nicht wesentlich über die später im Bauplan enthaltenen Objekte hinausgeht. Datenbankbasierte Modelle wie Building Information Modelling (BIM) können stattdessen sämtliche Informationen beinhalten, die für die Planung, den Betrieb sowie den späteren Rückbau des Bauwerks relevant sind (Abb. 04).

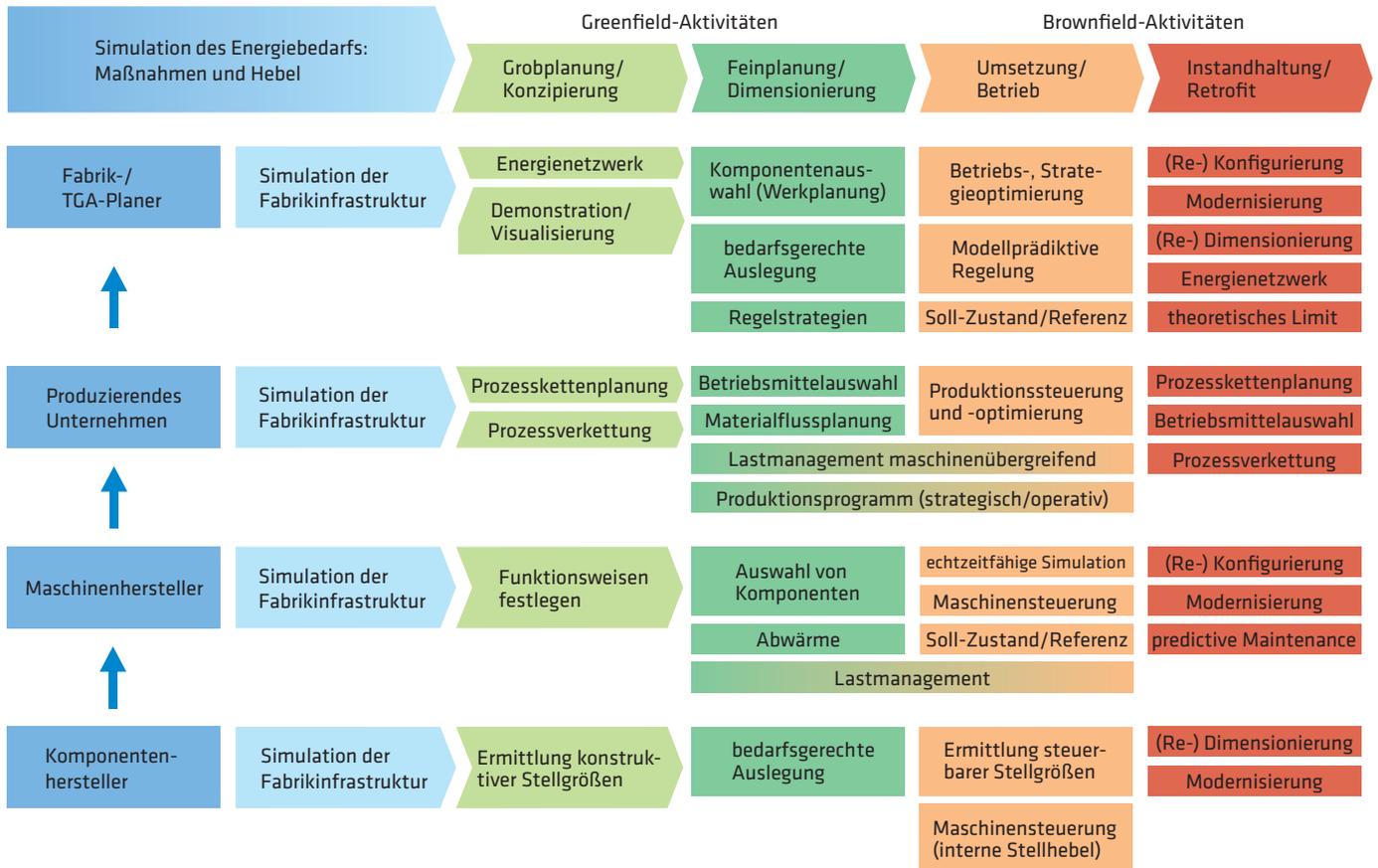
Zu diesen Daten gehören sowohl graphische, geometrische und alphanumerische Parameter, aber auch Massen, Eigenschaften und Kennwerte von Bauteilen und Einrichtungen. Somit kann BIM die klassischen Aufgaben von Architekturmodellen, die Unschärfe im Entwurfsprozess für Variantenstudien, die Ausarbeitung von Genehmigungs- und Ausführungsplanungen mit Leitdetails und auch gerenderte Präsentationsmodelle berücksichtigen. Das Werkzeug bietet somit im Planungs- und Bauprozess einen Mehrwert für Bauherren, Bauleiter und ausführende Firmen – insbesondere aber auch später, während des Betriebs, für Facility-Manager. Dies bietet die Chance, im Planungsprozess, während der Ausführung und auch in der Nutzungsphase Zielkonflikte frühzeitig zu erkennen und somit die Wirtschaftlichkeit sämtlicher Schritte zu optimieren.

Von der partiellen zur integralen Simulation – ein Ausblick

Das Factory Life Cycle Design und Management soll eine Plattform für einen lebenszyklusorientierten Entwurf und Betrieb von Fabriken bieten. Diese ermöglicht es, über eine vernetzte Simulationsumgebung den Energieverbrauch von Fabrikssystemen ganzheitlich zu analysieren (Abb. 06).

06 Prinzip der Gesamtsimulationsumgebung





07 Anwendungsfelder in der Fabriksimulation

Darauf aufbauend soll ein virtuelles MSR-System etabliert werden, das Simulationsmodelle hervorbringt, die auf Echtzeitdaten basieren und so die Grundlage schafft, eine selbstoptimierende oder parametrisch optimierte Fabrik- und Produktionssteuerung umzusetzen. Gleichzeitig werden die aufgelaufenen energiebezogenen Daten in einer Datenbank gespeichert, die somit als Wissensbasis für künftige Planungs- und Auslegungsentscheidungen dienen. Auf diese Weise lässt sich die mit der Modularisierung der Fabrik einhergehende Komplexität beherrschen, was wiederum dazu führt, die Transaktionskosten von Effizienzmaßnahmen in die Industrie zu reduzieren. ■

Innovationen der virtuellen ETA-Fabrik

- Schaffung maßgeschneiderter Auslegungswerkzeuge für die am Fabrikplanungsprozess beteiligten Personen;
- Durchführbarkeit von Simulationsversuchen, um optimale Betriebsstrategien zu planen und die Wirtschaftlichkeit einzelner Maßnahmen zu erhöhen;
- Aufzeigen anlagenübergreifender Auswirkungen auf den Gesamtenergieverbrauch der Fabrik (elektrisch und thermisch).







ETA-Forum

Theorie und Praxis unter einem Dach

Unter dem Dach des ETA-Forums werden die Arbeitsschwerpunkte Forschung, Aus- und Weiterbildung sowie Umsetzung zusammengefasst. Im Fokus steht – neben dem langfristigen Transfer von wissenschaftlichem Knowhow in die Industrie – die Vernetzung mit (regionalen) Unternehmen.

Forschung – In der ETA-Fabrik forschen die wissenschaftlichen Mitarbeiter in den Bereichen Energieeffizienz und Energieflexibilität. Gestützt werden diese Arbeiten von Demonstratoren, anhand derer sich die untersuchten Sachverhalte veranschaulichen und erproben lassen. Unsere Mitarbeiter stellen ihre Resultate regelmäßig auf internationalen Konferenzen vor und bleiben durch den dortigen Austausch auf Expertenebene stets für die aktuellsten Forschungsbrennpunkte von heute und morgen sensibilisiert.

Aus- und Weiterbildung – Getreu dem Motto „Learning by Doing“ können Interessierte aus Industrie und Wirtschaft in unseren Workshops Energieeffizienz zum Anfassen erleben und lernen, Potenziale zu erkennen. All unsere Schulungsangebote sind eng mit unserer Lernfabrik verknüpft: Rundgänge, praxisnahe Übungen und das Einbeziehen der Technolgie-demonstratoren sorgen für eine anwendungsorientierte Wissensvermittlung. Auch

für unseren wissenschaftlichen Nachwuchs wird bestens gesorgt: Wir bieten für Studenten bereits eine Vorlesung zum Thema Energieeffizienz und -flexibilität sowie zu weiteren energiebezogenen Schwerpunkten in der Produktion an. Darüber hinaus besteht ein universitäres Fortbildungsprogramm, welches berufsbegleitend verfolgt werden kann.

Umsetzung – Interessierten Unternehmen bieten wir energiebezogene Dienstleistungen in Form von umfassenden Vor-Ort-Analysen an. In diesem Rahmen ist auch eine kundenspezifische Bewertung von Effizienzmaßnahmen möglich, und wir begleiten auf Wunsch die entsprechende Umsetzung.

Für einen stetigen gegenseitigen Austausch und beste Voraussetzungen für gemeinsame Forschungsaktivitäten pflegen wir im ETA-Forum zudem Arbeitskreise und bilaterale Kleinprojekte. Wir stellen uns kooperativ den aktuellen Herausforderungen bei den Themen Energieeffizienz und -flexibilität in der Produktion und erarbeiten dafür Lösungen. Basis hierfür ist die tagtäglich gelebte enge Zusammenarbeit zwischen unseren Wissenschaftlern und unseren Partnerunternehmen.

Weiterführende Informationen sowie Angebote erhalten Sie gerne auf Anfrage. ■



Factsheet (1)

Resultate für die Industrie

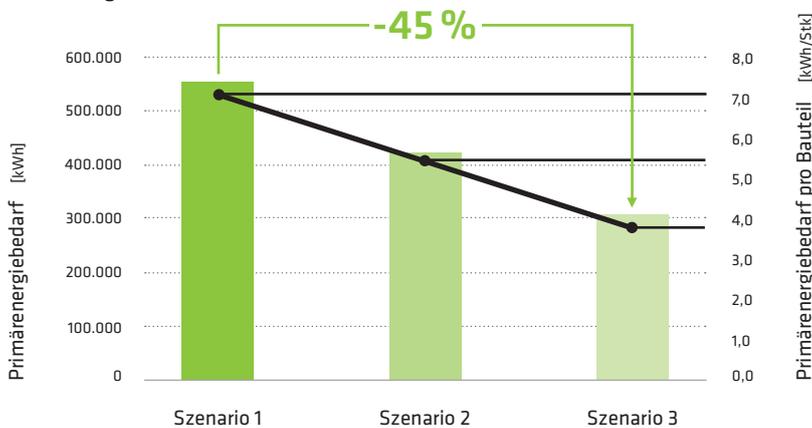
Um herauszufinden, wie wirksam die in der ETA-Fabrik durchgeführten Maßnahmen sind, wurden drei Betriebsszenarien gegenüber gestellt. Allen Szenarien gemein sind die jeweilige Einsatzdauer und der Auslastungsgrad der Produktionsmaschinen. Das Ergebnis zeigt, dass durch die im Projekt erarbeitenden Maßnahmen insgesamt **45 Prozent Primärenergie eingespart** werden können. Dies entspricht **247.700 kWh und 130.500 kg CO₂ pro Jahr**.

Die ETA-Fabrik hat sich mit den vielfältigen Umsetzungen und Teststellungen verschiedener Forschungsthemen als exklusives Forschungsumfeld etabliert. Gleichermaßen ist es das er-

klärte Ziel, die erfolgreichen Ergebnisse in den produzierenden Unternehmen auch anzuwenden. Um dies beispielhaft zu untersuchen, wurde am Standort Elchingen des Forschungspartners Bosch Rexroth ein Teilbereich der Fertigung analysiert.

Die in der ETA-Fabrik erarbeiteten Effizienzlösungen können im gesamten Anlagenbestand etwa **1.325.000 kWh** Primärenergie einsparen. Dies entspricht je MAE (Maschine, Anlage, Equipment) einem durchschnittlichen elektrischen Einsparpotenzial von 24 Prozent. Zudem schlummern bei der Wärmerückgewinnung Einsparpotenziale von rund **900.000 kWh**.

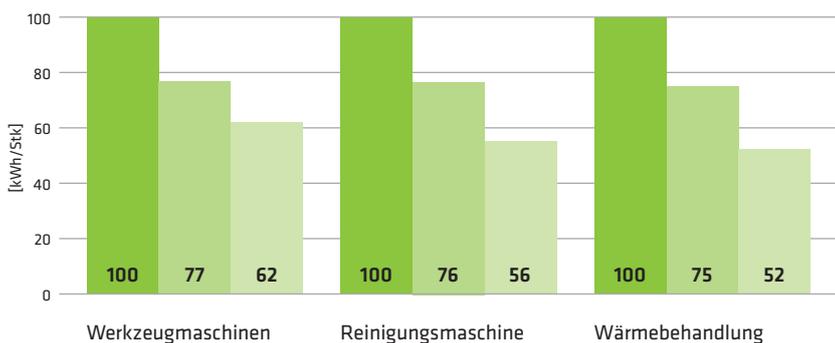
Primärenergiebedarf der ETA-Fabrik



Annahmen

- 17 Produktionsschichten pro Woche/8 h Produktion
- Auslastung der Produktionsanlagen
Werkzeugmaschinen 70 %,
Reinigungsmaschine 40 %,
Wärmebehandlungsöfen 80 %
- Primärenergiefaktoren
Strom 1,8; Erdgas 1,1

Vergleich des Primärenergiebedarfs pro Bauteil der einzelnen Produktionsmaschinen im Betrieb der ETA-Fabrik (Szenario 1 = 100 %)



Szenario 1

- Standardmaschinen
- Kälteerzeugung mittels Kompressionskälte
- Wärmeerzeugung aus elektrischer Energie

Szenario 2

- Energieeffizienzmaßnahmen implementiert
- Beheizung der Wärmebehandlung durch Erdgas-Rekuperationsbrenner

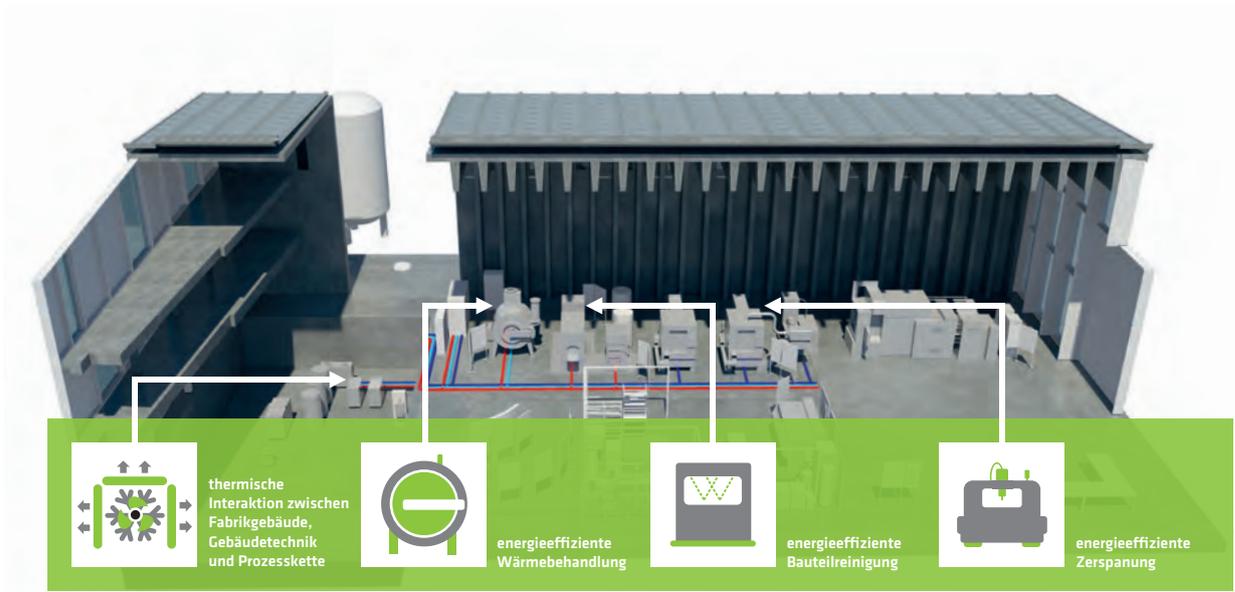
Szenario 3

- thermische Vernetzung von Ofen und Reinigungsmaschine
- Kühlung des Ofens und Werkzeugmaschinen durch Gebäudehülle



Factsheet (2)

Energieeffizienzmaßnahmen für die Industrie



Die ETA-Fabrik mit der Produktionskette im Schnittmodell. Es wurden Anstrengungen zur Energieeffizienz in den Bereichen Zerspanung, Bauteilreinigung und Wärmebehandlung entwickelt und umgesetzt. Die Maßnahmen sind den drei Betriebsszenarien zugeordnet. Darüber hinaus wurden weitere Energieoptimierungen entwickelt (»Alternativtechnologien«), die als Substitutionsmaßnahme nicht in die Szenarienanalyse eingeflossen sind und daher einzeln ausgewiesen werden.



thermische Interaktion zwischen Fabrikgebäude, Gebäudetechnik und Prozesskette	
Maßnahme	Einsparpotenzial im Rahmen ETA-Fabrik Betriebsszenario 3
Einbindung von Wärmetransformationstechnologien	
Einbindung von elektrisch betriebenen Wärmepumpen zur Vernetzung von Werkzeug- und Reinigungsmaschinen	Potenzial in der ETA-Fabrik: 38 %
Einbindung von Absorptionskältemaschinen (AKM) zur Kühlung von Werkzeugmaschinen und des Gebäudes mit Abwärme aus Härteöfen	Zum Betrieb der AKM wird nur die elektrische Leistung der Pumpen und der Steuerung der Anlage benötigt. Diese beläuft sich in der ETA-Fabrik auf maximal 1 kW. Hinzu kommen die Pumpen an Ofen, Werkzeugmaschine, Fußbodenkühlung, sowie der KaRoMas, die bei zusätzlich maximal 4 kW liegen.
Zusätzliche Nutzung der AKM zur Beheizung des Gebäudes	
Einbindung von VSI-Schichtspeichern als Hochtemperaturenergiespeicher	
Nutzung von VSI-Schichtladespeichern zur Speicherung von Abwärme von der Wärmebehandlung	Ermöglicht die optimale Wiederverwertung von Abwärme von der Wärmebehandlung zum Beispiel zur Beheizung der Reinigungsmaschine
Methoden zur Auslegung thermisch-hydraulischer Netze	
Nutzung eines Simulationsmodells der thermischen Netze der ETA-Fabrik zur Quantifizierung des Einsatzpotenzials verschiedener Vernetzungstechnologien in anderen Fabriken	Ermöglicht die Bewertung verschiedener Energieeinsparmaßnahmen
Entscheidungsmethodik zum Einsatz thermischer Industrietechnik	Ermöglicht die systematische Erfassung von Energieeinsparpotenzialen durch thermische Vernetzung von passenden Wärmequellen- und Senken



energieeffiziente Wärmebehandlung		
Maßnahme	Einsparpotenzial im Rahmen ETA-Fabrik	Betriebsszenario
medieneffiziente Wärmebehandlung		Szenario 1
optimierte Prozessregelung durch Nitrierkennzahlen	> 10 % Nitriergas	Alternativ-technologie
gepulste Prozessgaszuführung	40 % Nitriergas	Alternativ-technologie
energieeffiziente Maschinentechnologien		
Reduzierung der Wärmeverluste	> 10 % Brenngas	Szenario 2
Rekuperationsgasbrenner	15 % Brenngas	Szenario 2
Wirkungsgradoptimierte Aggregate - Regelung des Verbrennungsluftgebläses - Drehzahlreduktion des Kühlluftgebläses	20 % elektrische Energie des Verbrennungsluftgebläses ca. 50 % elektrische Energie des Kühlluftgebläses (Prozesseinfluss ist zu beachten)	Szenario 2
Abwärmerückgewinnung der Prozessgasabfackelung	15 %	Szenario 3
optimierte Abgasabfackelung	> 20 % Brenngas	Alternativ-technologie
Reihenschaltung der Kühlkreisläufe	Steigerung der Exergie um 6 kW	Szenario 3



energieeffiziente Bauteilreinigung		
Maßnahme	Einsparpotenzial im Rahmen ETA-Fabrik	Betriebsszenario
Anwendung energieeffizienter Reinigungsverfahren	> 65 %	Szenario 1
Optimierung von Reinigungshilfsstoffen	bis zu 50 %	Alternativ-technologie
Konzept für eine werkzeugmaschinenintegrierte Vorreinigung mittels Laserreinigungsverfahren	42 %	Alternativ-technologie
energieeffiziente Maschinentechnologien		
Reduzierung der Wärmeverluste und wirkungsgradoptimierte Aggregate	> 28 %	Szenario 2
Abwärmerückgewinnung durch Wärmepumpe	> 25 %	Szenario 2
Entwicklung eines Wärmeaustauschmoduls	38 %	Szenario 3



energieeffiziente Zerspanung		
Maßnahme	Einsparpotenzial im Rahmen ETA-Fabrik	Betriebsszenario
energieeffiziente Maschinentechnologien		
Einsatz drehzahlvariabler Hydraulikpumpen	> 50 %	Szenario 2
Bedarfsgerechte Kühlschmierstoffversorgung durch drehzahlgeregelte Kreiselpumpe	21 %	Szenario 2
Einsatz bedarfsgerechter Kälteerzeugung	51 % (Maschinenrückkühler) 84 % (Schaltschrankkühler)	Alternativ-technologie
Einsatz von energie- und ressourceneffizienten Antriebsalternativen	Senkung der Verluste um 40 % Wirkungsgradsteigerung um 5 %	Alternativ-technologie
Abwärmerückgewinnung		
Maschinenkühlung ohne Kompressionskältemaschine durch Wärmeaustauschmodul	ca. 10-25 % des Energiebedarfs auf Maschinenebene; Zentrale Erzeugung wurde gegengerechnet	Szenario 3
bedarfsgerechte Kühlung des Kühlschmierstoffs durch Taktung der KSS-Umwälzpumpe	> 50% in Bearbeitung	Szenario 3

Die wichtigsten Eckdaten zur ETA-Fabrik

Finanzierung

Gefördert durch Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
 Betreut vom Projektträger Jülich
 Unterstützt durch das Land Hessen
 Finanziert mit Drittmitteln der Industrie sowie Eigenmitteln der Technischen Universität Darmstadt sowie der Fachgebiete PTW und ISM+D

Projektkoordination

Gesamtprojekt: Technische Universität Darmstadt FB Maschinenbau
 Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen
 Leitung: Prof. Dr. -Ing. Eberhard Abele
 Projektleitung: Dipl.-Wirtsch.-Ing. Martin Beck

Gebäudebau: Technische Universität Darmstadt FB Bau und Umwelt-
 ingenieurwissenschaften | Institut für Statik und Konstruktion
 Leitung: Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider
 Projektleitung: Dipl.-Ing. Andreas Maier

Forschungsinstitute

TU Darmstadt | FB Maschinenbau | Institut für Produktionsmanagement,
 Technologie und Werkzeugmaschinen
 Leitung: Prof. Dr. -Ing. Eberhard Abele

TU Darmstadt | FB Maschinenbau | Institut für Mechatronische Systeme im
 Maschinenbau
 Leitung: Prof. Dr. -Ing. Stephan Rinderknecht

TU Darmstadt | FB Bau- und Umweltingenieurwissenschaften | Institut für
 Statik und Konstruktion, LPh 1-3 Tragwerksplanung, LPh 1-8 Fassadenplanung
 Leitung: Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider

TU Darmstadt | FB Architektur | FG Entwerfen und Baugestaltung, LPh 1-3
 Architektur
 Leitung: Prof. Dipl.-Ing. Johann Eisele und Dr.-Ing. Frank Lang

Universität Stuttgart | FB Bau und Umweltingenieurwissenschaften | Institut
 für Werkstoffe im Bauwesen
 Leitung: Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht

TU Darmstadt | FB Bau und Umweltingenieurwissenschaften | Institut für
 Werkstoffe im Bauwesen
 Projektleitung: Dr -Ing. Albrecht Gilka-Bötzow

Bautafel

Projektidee: 01/2011
 Projektbeginn: 05/2013
 Baubeginn: 09/2014
 Fertigstellung: 03/2016

Bauherr: TU Darmstadt, Dezernat V Baumanagement und Technischer Betrieb

Leitung: Dipl.-Ing. Edgar Dingeldein

Projektleitung: Dipl.-Ing. Georg Rombusch

Standort: TU Darmstadt, Campus Lichtwiese

Kennwerte Gebäude:

Nutzfläche 960 m²
 BGF / BRI 1.450 m² / 10.000 m³
 Länge 40 m
 Breite 20 m
 Höhe 11 m

Planung

Architektur

Dietz Joppien Architekten AG, Frankfurt/M. Potsdam, LPh 3-9 Entwurfs-,
 Genehmigungs- und Ausführungsplanung, Ausschreibung, Bauüberwachung

Leitung: Prof. Dipl.-Ing. M.Arch. Anett-Maud Joppien, Dipl.-Ing. M.Arch. Albert
 Dietz | Projektleitung: Dipl.-Ing. Joachim Stephan

Technische Anlagen

Kruse Ingenieurgesellschaft mbH/Co.KG Heizung, Lüftung, Klima, Sanitär,
 Elektro | Leitung: Dipl.-Ing. Ronald Kruse | Projektleitung: Lindrun Winkler
 Wien Architekten Hypokaustendecke | Leitung: Dipl.-Ing. Alexander Wien

Tragwerk, Wärmeschutz

osd office for structural design | Leitung: Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
 Projektleitung: Dr.-Ing. Frank Brückner

Freiflächen

Sommerlad Haase Kuhli
 Leitung: Raimund Haase | Projektleitung: Daniel Müller

Projektpartner Innovationen

Produktion/Maschinen

Bosch Rexroth AG

Steuerungstechnik, Antriebstechnik, Hydraulik

Clean Lasersysteme GmbH, Laser Reinigungsmaschinen

EMAG GmbH & Co. KG, Werkzeugmaschinen, Fertigungssysteme

MAFAC E. Schwarz GmbH & Co. KG, Maschinen zur wässrigen Teilereinigung

GTW GmbH, Mechatronische Systeme in der Wälzlager-technik, Spindeleinheiten

IVA Industrieöfen GmbH, Industrieöfen, Komplettssysteme

IWT Bremen, Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Werkstofftechnik,
 Verfahrenstechnik, Oberflächentechnik

ZAE Bayern e. V., Angewandte Energieforschung

Gebäude

Ducon GmbH & Co.KG, Bietergemeinschaft Röser Ingenieurbeton/Traub GmbH
 & Co.KG | Fertigteilfassade, Dachkonstruktion

Franz Oberndorfer GmbH & Co KG, Hohlkammerdielen

Schüco International KG, Parametric-Fassade

Okalux, Vakuuminisierpaneele, Lichtlenklamellen, Lichtstreuende Isolier-
 glaseinlage

Dow Corning, Structural Glazing Silikon

Ausstattung Maschinen

Werkzeugmaschinen: EMAG VLC 100 Y (Vertikaldrehmaschine),
 EMAG VLC 100 GT (Vertikaldrehmaschine), MAG XS 211 (Bearbeitungszentrum)

Reinigungsmaschine: Mafac Java (2-Bad wässrige Reinigung), Mafac Kea
 (1-Bad wässrige Reinigung), Cleanlaser CL-50 (Laserreinigung)

Ofen: IVA RH 655 (Gasnitrierofen)

Ausstattung Gebäudetechnik

Wärmeerzeugung: Viessmann Vitobloc EM 6/15 und EM 9/20 Viessmann
 Vitodens 200-W

Kälteerzeugung: Viessmann Vitocal 350, Scherdel Absorptionskältemaschine

Thermische Speicher: Viessmann Vitocell 2x1 m³ Hummelsberger VSI 6 m³
 Finger Beton HVFA 2x13 m³/1x25 m³

Drucklufterzeugung: Atlas Copco VSD22+

Pumpentechnologie: Grundfos (vorwiegend Magna 3)

Beleuchtung: Luxstream

E-Tankstelle: TU Darmstadt | FG Elektrische Energieversorgung unter Einsatz
 erneuerbarer Energien

Elektrofahrzeug

Opel Ampera

Projektpartner:



Wir danken unseren Förderern BMWi und dem Land Hessen sowie der TU Darmstadt für die finanzielle und administrative Unterstützung und allen Projektbeteiligten, Planungsbüros und Unternehmen für die inhaltliche Zusammenarbeit im Forschungsprojekt ETA-Fabrik. Die bei dem Projekt erzielten Ergebnisse sind die Grundlage für diese Broschüre.

Ansprechpartner:

Technische Universität Darmstadt
Institut für Produktionsmanagement,
Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)
Eugen-Kogon-Str. 4
64287 Darmstadt

Tel.: +49 6151 / 16 200 80
Mail: info@ptw.tu-darmstadt.de
URL: www.eta-fabrik.de

Technische Universität Darmstadt
Institut für Statik und Konstruktion (ISM+D)
Franziska-Braun-Straße 3
64287 Darmstadt

Tel.: +49 6151 / 16 230 13
Mail: mailbox@ismd.tu-darmstadt.de
URL: www.ismd.tu-darmstadt.de



ETA – Energieeffizienz-, Technologie- und Anwendungszentrum

Die ETA-Fabrik steht für die Forschung und Entwicklung von innovativen Technologien, die den industriellen Produktionsprozess effizienter machen und das Vernetzen der Energiesysteme innerhalb einer Fabrik zum Ziel haben. Dabei beschränkt sich die energetische Vernetzung nicht allein auf die Maschinen und Komponenten, sondern bezieht auch das Gebäude und die Interaktion mit dessen Hülle ein. Dazu bedarf es der übergreifenden Zusammenarbeit zwischen

den am Fabrikbau und -betrieb beteiligten Ingenieurdisziplinen. Unser gemeinsamer Anspruch ist es, Energieeffizienz weiter zu denken und die Ergebnisse der Forschung einem breiten Fachpublikum zugänglich zu machen. Für Wissenschaftler und Studenten ist die ETA-Fabrik ein Großforschungsgerät, das als bundesweites Vorzeigeprojekt demonstriert, wie sich energieeffiziente Konzepte, Technologien und Entwicklungen in die Praxis umsetzen lassen.



www.eta-fabrik.de

