

Maurer Services GmbH

**Smart Energy Monitoring in Druckmaschinen
[SEMpress]**

Abschlussbericht über ein Kooperationsprojekt,
gefördert unter dem Az: 32902 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Michael Mayer, M.Sc. Sarah Jobst
Dr.-Ing. Andreas Maurer, Prof. Dr.-Ing. Arved C. Hübler

Dezember 2017

Maurer Services GmbH

**Smart Energy Monitoring in Druckmaschinen
[SEMpress]**

Abschlussbericht über ein Kooperationsprojekt,
gefördert unter dem Az: 32902 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Michael Mayer, M.Sc. Sarah Jobst
Dr.-Ing. Andreas Maurer, Prof. Dr.-Ing. Arved C. Hübler

Dezember 2017

06/02

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	32902/01	Referat	14	Fördersumme	119800 €
Antragstitel		Smart Energy Monitoring in Druckmaschinen (1. Phase)			
Stichworte					
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
18 (+2) Monate	06.07.2015	05.03.2017	1		
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger	Maurer Services GmbH Tiefenthaler Straße 14 67280 Ebertsheim			Tel	06359/8000-0
				Fax	06359/8000-80
				Projektleitung	Dr. Andreas Maurer
			Bearbeiter	Dr. Michael Mayer	
Kooperationspartner	Technische Universität Chemnitz Professur Printmedientechnik Jungfer Druckerei und Verlag GmbH Bosch Rexroth AG				

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Im Projekt *Smart Energy Monitoring in Druckmaschinen SEMpress* wird das Thema Energiemanagement für Druckmaschinen aufgegriffen und ein energetisches Grundmodell unter Einbeziehung realer Prozessparameter für eine Druckmaschine aufgestellt. Als Basis für das Forschungsvorhaben dienen zwei Druckanlagen: Eine Labordruckmaschine *LaborMAN II* an der *Professur Printmedientechnik der TU Chemnitz pmTUC* sowie eine Illustrationsrollenoffsetdruckmaschine *LITHOMAN IV*, die bei der *Jungfer Druckerei und Verlag GmbH* im realen Produktionsprozess betrieben wird.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die Energieeffizienz der industriellen Rollenoffsetproduktion zu steigern. An der Labordruckmaschine werden mehrere maschinen- als auch drucktechnisch relevante Parameter variiert, um über die Auswertung Kenntnisse über den Einfluss der Parameter auf die Leistungsaufnahme und somit auf den Energieverbrauch der Maschine zu erhalten. Damit wird eine Quantifizierung der Einflussparameter und somit die Ermittlung von Energieeinsparpotentialen an Druckmaschinen ermöglicht. Das Forschungsergebnis soll Modellcharakter haben und somit auch auf andere Sektoren der Druckbranche adaptierbar sein. Um dieses Ziel zu erreichen, liegt der Fokus in einem ersten achtzehnmonatigen Teilprojekt auf der Schaffung der benötigten Infrastruktur sowie Vor-Untersuchungen zur messtechnischen Erfassung der Energieverbräuche in Abhängigkeit weniger Parameter sowie die Auswertung der erfassten Da-

ten und die Ergebnisdarstellung.

Von Seiten der *Deutschen Bundesstiftung Umwelt* wurde das gesamte Forschungsvorhaben in zwei Phasen unterteilt. In der ersten Phase werden grundlegende Untersuchungen durchgeführt, eine Erweiterung und Detaillierung der experimentellen Versuche ist für die zweite Projektphase vorgesehen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Das Projekt SEMpress (1. Phase) ist in drei Arbeitspakete untergliedert. Im ersten Arbeitspaket wird eine geeignete Infrastruktur an den Versuchsanlagen erstellt und die elektrischen Messsysteme installiert, u. a. Energiemessklemmen, Buskoppler, Stromwandler, Schnittstellen, Software. Hierbei gilt es den Stand der Technik bezüglich steuerungsseitigem Energiemanagement anzuwenden. Für die zur Verfügung stehenden Maschinen bedeutet dies, dass in den bestehenden Programmcode die Technologiefunktion des Energy Efficient Managements (4EE-Systematik, *Bosch Rexroth*) eingebunden werden muss. Für die Umsetzung müssen alle Verbraucher der Anlage kategorisiert und deren Energieverbrauchsmessung realisiert werden. Die zu verwendende Technologiefunktion ermöglicht sowohl eine Energieverbrauchsanzeige, als auch eine Energieverbrauchssteuerung der einzelnen Verbraucher.

Im zweiten Arbeitspaket gilt es die realen Leistungsaufnahmen der Verbraucher der Laboranlage messtechnisch zu erfassen. Die benötigten Daten ergeben sich direkt aus Messungen, z. B. von Energiemessklemmen bzw. durch Auslesen von Energiezählern oder indirekt über Berechnungen. Die Ermittlung des Leistungs- und Energieverbrauchs erfolgt in Abhängigkeit verschiedener Maschinenzustände und für grundlegende drucktechnisch relevante Parameter an der Labordruckmaschine der *Professur Printmedientechnik der Technischen Universität Chemnitz pmTUC*.

Als Ergebnis der Untersuchungen werden im dritten Arbeitspaket Zusammenhänge zum Energieverbrauch abgeleitet, welche an der Produktivmaschine bei *Jungfer* validiert werden.

Ergebnisse und Diskussion

In dieser ersten Projektphase lag der Schwerpunkt auf den Prozessparametern. Um diese zu untersuchen, wurden fünf Versuchsreihen aufgestellt: Variation der Geschwindigkeit (Grundversuch), Variation der Bahnführung, Variation der Bahnzugkräfte, Variation der Zylinderdurchmesser und Variation der Kraft bei Zylinderzustellung.

Mit Hilfe des Grundversuchs konnte ein energetisches Modell für Druckmaschinen aufgestellt werden. Dieses Modell setzt sich aus dem Grundmodell und zwei Erweiterungen zusammen. Die Versuche zeigten, dass zwischen Maschinengeschwindigkeit und Energieverbrauch eine lineare Abhängigkeit besteht. Die Verbraucher können dabei in Konstant-Verbraucher und lastabhängige Verbraucher eingeteilt werden. Diese Erkenntnis dient als Basis für das Grundmodell. Über Variationen verschiedener Prozessgrößen konnten die Abhängigkeiten des Energieverbrauchs zu den jeweiligen Maschinenparametern analysiert werden. Diese Ergebnisse bilden die erste Modellerweiterung. Die zweite Erweiterung beinhaltet materialspezifische Prozessgrößen.

ßen und soll Bestandteil einer zweiten Projektphase werden.

An der *LaborMAN II* wurden grundlegende drucktechnisch relevante Prozessparameter variiert und deren Auswirkung auf die Leistungsaufnahme untersucht. Aus den Versuchsdaten konnte ein Ranking der energetischen Einflussparameter auf den Druckprozess erstellt werden.

An einer *LITHOMAN IV* Produktionsmaschine wurde die Leistungsaufnahme der gesamten Druckmaschine als auch typischer Verbrauchergruppen während einer Produktionsphase aufgezeichnet und analysiert werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Erkenntnisse aus dem Projekt „*SEMpress – Smart Energy Monitoring in Druckmaschinen*“ fließen in die Lehre der *Professur Printmedientechnik der Technischen Universität Chemnitz* ein. Die erste Veröffentlichung der Projektergebnisse erfolgte im Rahmen des Bahnlaufseminars im September 2016 (ISBN-Nr. 978-3-89700-115-2). Ein zweiter Vortrag folgte im Programm des 6. Ressourceneffizienz- und Kreislaufwirtschaftskongress Baden-Württemberg im Oktober 2017. Weitere Veröffentlichungen in renommierten Fachzeitschriften sind geplant.

Fazit

Im Rahmen des Projektes konnte gezeigt werden, mit welchen Mitteln eine energetische Transparenz einer Druckmaschine geschaffen werden kann. Die Möglichkeit der Leistungsmessung der Einzelverbraucher gibt Aufschluss über mögliche energetische Einsparpotentiale. Weiterhin kann das Wissen über den Grundverbrauch in den jeweiligen Maschinenzuständen eine Sensibilität für abnormales Maschinenverhalten generieren und demzufolge für Zwecke des Condition Monitorings genutzt werden.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass für Aussagen hinsichtlich der Skalierbarkeit zwischen Labor- und Produktionsmaschine weiterführende und detailliertere Untersuchungen notwendig sind, welche in einer zweiten Projektphase angestrebt werden.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
2	VORHABENDURCHFÜHRUNG UND -ERGEBNISSE	5
2.1	Energieverbrauch für unterschiedliche Maschinenzustände der <i>LaborMAN II</i>	11
2.2	Unterschiedliche Pressungszustände in beiden Druckwerken mit Papierbahn (Grundversuch)	12
2.3	Unterschiedliche Pressungszustände in beiden Druckwerken ohne Papierbahn.....	16
2.4	Unterschiedliche Pressungszustände zwischen generatorischer und motorischer Achse im Tiefdruckwerk ohne Papierbahn	18
2.5	Analyse verschiedener Pressungszustände zwischen drei motorischen Achsen im Flexodruckwerk	21
2.6	Konstant-Geschwindigkeits-Versuche unter Variation der Bahnzugkräfte bei jeweiliger Abwicklung eines kompletten Papierwickels	23
2.7	Analyse zur Anzahl und Umschlingung von Leitwalzen	31
2.8	Analyse der Hart-Weich-Zylinderpaarung mit Einzelantriebstechnik	35
2.9	Zusammenfassung und Quervergleich der <i>LaborMAN II</i> -Versuchsergebnisse.....	40
2.10	Ranking der untersuchten Einflussparameter an der Labordruckmaschine auf den Energieverbrauch	50
2.11	Versuchsergebnisse an der Produktionsmaschine <i>LITHOMAN IV</i>	52
3	ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT	69
4	LITERATURVERZEICHNIS.....	72

1 EINLEITUNG

Rasant steigende Energiepreise in Verbindung mit Umweltschutzziele und Schonung vorhandener Ressourcen haben in den letzten Jahren in den industriellen Betrieben für ein stetig wachsendes Interesse im Bereich des Energiemanagements gesorgt. Damit einhergehend wird ein geringerer Energiebedarf bei gleichen Prozessen zunehmend zum Wettbewerbsvorteil. Nach ISO 50001 sollen Energiemanagementsysteme Einzug in die Unternehmen finden. Zusätzlich werden energieeffizientere Neuanlagen von der KfW gefördert. Das Thema Energieeffizienz ist allerdings auch für Bestandsanlagen, welche mit vertretbarem Aufwand effizienter laufen können, interessant. Somit sind die für kleine Betriebe risikobehafteten Großinvestitionen nicht immer nötig, um einen Teil zur Umweltschonung beizutragen.

Am 14. November 2016 wurde vom Bundeskabinett der Klimaschutzplan 2050 beschlossen, welcher die klimapolitischen Ziele der Bundesregierung beinhaltet und den Weg zu deren Erreichung bis zum Jahr 2050 beschreibt. Mit diesem Klimaschutzplan wird das Gesamtziel des Pariser Klimaschutzabkommens auf einzelne Sektoren heruntergebrochen und anhand dessen Ziele der einzelnen Wirtschaftszweige definiert. Für den Sektor „Industrie und Wirtschaft“ heißt es wortwörtlich, dass *„Klimaschutz ein Treiber für Effizienz und Innovation und damit – neben einer Industrialisierung 4.0 – für eine Modernisierungsstrategie [ist.] (...) Wesentliches Element dieses Modernisierungspfades ist eine Hocheffizienzstrategie zur Minimierung des Ressourcen- und Energiebedarfs in der Produktion, einschließlich einer kontinuierlichen Forschung und Entwicklung zur Erschließung weiterer Potenziale. (...) Dabei gilt es gleichzeitig, Material- und Energieeffizienz in Industrie und Wirtschaft verstärkt zusammenzuführen. Bis 2030 sollen die Vermeidung von Ausschuss sowie die Kreislaufführung von Materialien in der Produktion möglichst weit vorangetrieben werden“* [1]. Bis zum Jahr 2050 soll die Emission von Treibhausgasen im Vergleich zu 1990 um mindestens 80 % verringert werden. Um dieses Ziel zu erreichen, soll der Primärenergieverbrauch um 50 % reduziert und zeitgleich der Anteil der erneuerbarer Energien die Mehrheit bekommen.

In Druckhäusern entfallen rund 90 % der Energiekosten auf den elektrischen Strom, was umgerechnet ca. 1,5 % des Umsatzes entspricht. Der größte Verbraucher ist dabei der Druckprozess selbst [2]. An dieser Stelle ist offensichtlich großes Einsparpotential vorhanden. Druckhäuser sollten demnach eine Langzeitstrategie entwickeln, bevor in neues Equipment und Anlagen investiert wird. Ein optimiertes Energiemanagement in der Produktion reduziert Herstellungskosten, verbessert das Arbeitsumfeld und schützt die Umwelt nachhaltig. Dieser grüne Fußabdruck wird für die Druckindustrie immer erstrebenswerter, da ihre Kunden zunehmend eine umweltschonende Produktion fordern. So entwickeln sich immer mehr Druckmaschinenhersteller und Druckereien in Richtung der makulaturarmen, nachhaltigen und CO₂-klimaneutralen Produktion, was neben dem Wettbewerbsfaktor auch einen finanziellen Anreiz mit sich bringt.

Um Energieeinsparungen vornehmen zu können, muss der Gesamtenergiebedarf je nach Betrachtungsebene – beispielsweise der Abteilung, Maschine, Baugruppe oder Komponente – bekannt sein. Die Ermittlung des zeitlichen Verlaufs des Energieverbrauchs mit der jeweili-

gen Zuordnung lässt sich mittels Strom-, Gas- und Wassermengenzähler durchführen. Weitere Energieverbrauchsdaten können auch über Nennleistungen (Typenschilder von Elektromotoren), Durchschnittsleistungen, Betriebszeiten und einfachen Berechnungen, beispielsweise von Pneumatikhüben abgeschätzt werden. Die Verbrauchsmessung dient dem Ziel, exemplarische Nutzungsprofile der ausgewählten Maschinen zu erstellen und zeitgleich den Verbrauch der einzelnen Maschinenkomponenten transparent und nachvollziehbar zu gestalten. Die Nutzungsprofile umfassen z. B. typische Produktions- und Stillstandszeiten und geben über die typischen Verweildauern in den jeweiligen Maschinenzuständen Aufschluss. Die Leistungsaufnahme der Verbraucher und Verbrauchergruppen bildet den ersten Schritt zu einer zustandsbasierten Verbrauchsmodellierung.

Im Jahr 2008 erschien von der PrintCity GMBH + Co. KG der „Energy Efficiency – Weblines Special Report Nr°4“ [3]. In diesem Bericht werden bereits bekannte Einflüsse von Prozessparametern auf den Energieverbrauch von Druckmaschinen zusammengetragen. Die Zusammenhänge werden allerdings sehr oberflächlich dargestellt, wobei anzunehmen ist, dass firmenintern tiefgründigere Versuche durchgeführt wurden. Doch dieses Wissen ist den Zulieferern und Produzenten von Druckmaschinen vorbehalten und kann somit nicht zur energetischen Verbesserung von Bestandsanlagen genutzt werden. Dennoch zeigen die Ergebnisse, welches Potential in der Optimierung von maschinen- und materialspezifischen Parametern liegt. Ähnlich verhält es sich mit der in PrintCity gezeigten Analyse zum Einfluss von Druckfarbe und Papier auf die Energie- und Ressourceneffizienz im Druckprozess. Die Ergebnisse zeigen ein eindeutiges Potential zur Optimierung des Energieverbrauchs sowie der benötigten Farbauftragsmenge durch Anpassen der Papiereigenschaften. Eine direkte Beziehung der Größen ist allerdings nicht erkennbar. An dieser Stelle wäre es interessant, die sich mit der Sorte des Papiers ändernden Verbrauchswerte der einzeln angetriebenen Achsen in der Druckmaschine auszuwerten.

Zudem wird beim VDMA mit dem Einheitsblatt 66412-4 „Kennzahlen für Energiemanagement“ [4] ein Industriestandard für die Ermittlung der energetischen Kennzahlen in Produktionszeiten festgelegt. Auch die Fogra, Forschungsgesellschaft Druck e.V., hat 2014 einen Leitfaden zur energetischen Analyse von Druckprozessen veröffentlicht, [5]. Dieser Leitfaden beschreibt die Berechnung der Gesamtenergieeffizienz in kg/kWh einer produzierenden Anlage durch Gegenüberstellung der Anzahl produzierter Druckprodukte mit der am Hauptanschluss der Maschine gemessenen Leistung. Diese vom VDMA und der Fogra verfolgten produktbezogenen Kennzahlen werden genutzt, um Energiekosten auf die hergestellten Produkte umzulegen. Somit findet eine Bewertung der Produktionseffizienz statt.

Auch das bayrische Verbundprojekt „FOREnergy – Die energieflexible Fabrik“ setzt an dieser Stelle an und plant die industriell weitgehend anerkannte Kennzahl für die Gesamtanlageneffektivität OEE (Overall Equipment Effectiveness) um den Faktor Energie zu erweitern (OEE^{+E}). Somit soll im modernen Produktionscontrolling neben den Werten der Verfügbarkeit, der Effektivität (Leistungsgrad) und der Qualitätsrate auch die Energieeffizienz berücksichtigt werden [6]. Über keine der bekannten Kennzahlssysteme kann eine Aussage über die Prozessparameter hinsichtlich Energieeffizienz getroffen werden. Hierzu fehlen energetische Modelle, welche Aufschluss über Prozesszusammenhänge liefern.

In diesem Zusammenhang sollen im Projekt „*SEMpress – Smart Energy Monitoring in Druckmaschinen*“ die drucktechnisch relevanten und den Energieverbrauch beeinflussenden Parameter systematisch zusammentragen und spezifiziert werden. Zur Sammlung der Daten werden zwei steuerungsseitig grundlegend ähnliche Rollendruckmaschinen eingesetzt: eine Labordruckmaschine *LaborMAN II* der *Professur Printmedientechnik der Technischen Universität Chemnitz pmTUC*, sowie ein Produktionssystem *LithoMAN IV (48 S)* bei der *Jungfer Druckerei und Verlag GmbH*. Die Labordruckmaschine am *pmTUC* hat 2013/2014 eine moderne Maschinensteuerung *MLC (Motion Logic Control)* von *Bosch Rexroth* erhalten. Zwei Jahre später wurde bei *Jungfer* die erste Rollendruckmaschine ebenfalls mit dieser *MLC* von *Bosch Rexroth* ausgestattet. Die Labordruckmaschine *LaborMAN II*, Abbildung 1, ist eine Rollendruckmaschine mit zwei Druckwerken, welche im Flexo-, Offset- oder Tiefdruckprozess verwendet werden können. Mithilfe diverser Sensorik werden Bahnspannungs-Istwerte und Farbregisterabweichungen über den gesamten Prozess überwacht. Die offene Bauweise mit einseitig gelagerten Achsen ermöglicht eine schnelle Variation der Bahnführung und bietet damit einen hohen Grad der Flexibilität.



Abbildung 1: Versuchsplattform *LaborMAN II* des *pmTUC*.

Mit der Rollenoffsetmaschine der *Jungfer Druckerei und Verlag GmbH*, Abbildung 2, besteht die Möglichkeit, im Labormaßstab gefundene Beziehungen auf Produktionsebene zu verifizieren. Diese beiden antriebs- und steuerungstechnisch identischen Maschinen bilden die Aktionsplattform für nachfolgende Forschungstätigkeiten.



Abbildung 2: Produktionsmaschine LITHOMAN IV (48 S) der Jungfer Druckerei und Verlag GmbH in Herzberg am Harz.

2 VORHABENDURCHFÜHRUNG UND -ERGEBNISSE

Im Rahmen des geförderten Projekts „*Smart Energy Monitoring in Druckmaschinen*“ (*SEMpress*) wurde der Energie- und Medienverbrauch von zwei unterschiedlichen Druckmaschinen, einer Rollenoffset-Druckmaschine im Labormaßstab (*LaborMAN II*) und einer Illustrationsrollenoffsetdruckmaschine (*LITHOMAN IV*), untersucht. Zum Erfassen und Speichern von Leistungs- und Verbrauchsdaten der Maschinen wird eine geeignete hard- und softwareseitige Messtechnik benötigt. Der Aufbau der Messstruktur, die für diese Versuche benötigt wurden, war ebenfalls Teil der Projektziele. Dazu wurde im Vorfeld eine Komponentenanalyse mit Vergleich beider Maschinen durchgeführt. Anhand dieser Ergebnisse konnte eine geeignete Messtechnik ausgesucht werden.

Für das Projekt ergeben sich die nachfolgend im GANT-Chart dargestellten Arbeitspakete über der Projektlaufzeit, Tabelle 1.

Bei der Versuchsanlage des *pmTUC* handelt es sich, wie zuvor schon beschrieben, um die Labordruckmaschine *LaborMAN* der *manroland AG*, Abbildung 3.

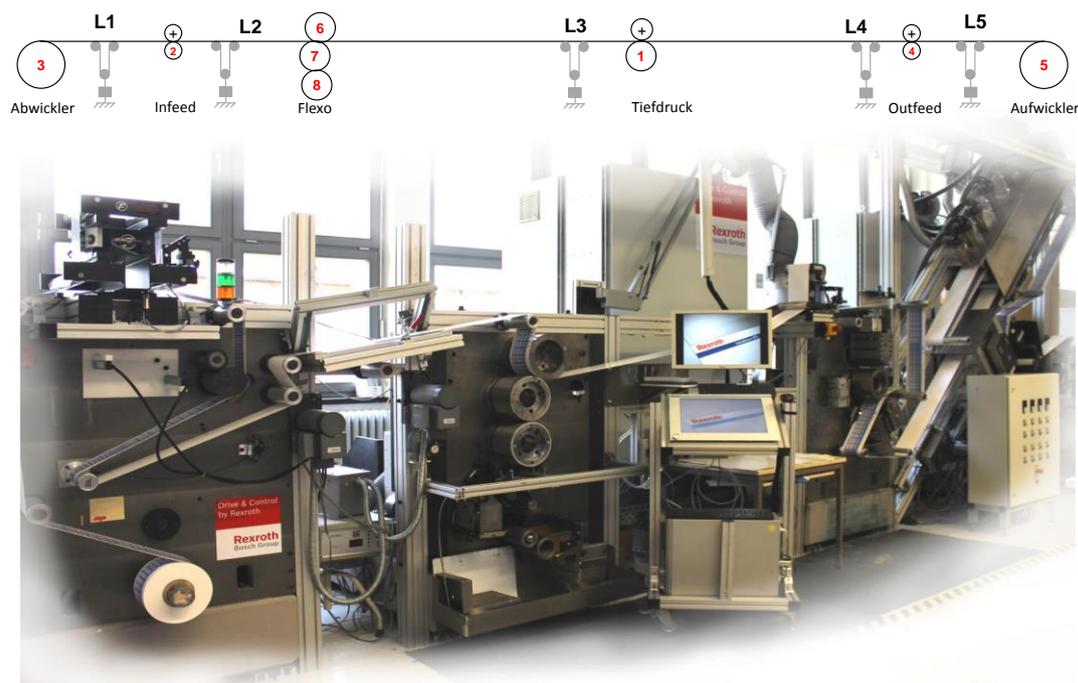


Abbildung 3: Labordruckmaschine *LaborMAN II* als Versuchsplattform für Energiemessungen.

Die Maschine ist nach dem Prinzip der Einzelantriebstechnik konstruiert und besteht aus Abwickler, Einzugswerk, zwei Druckwerken, Trockner, Auszugswerk und Aufwickler. Dabei werden die Wickler, die Zugwerke und das zweite Druckwerk mit je einem Elektromotor

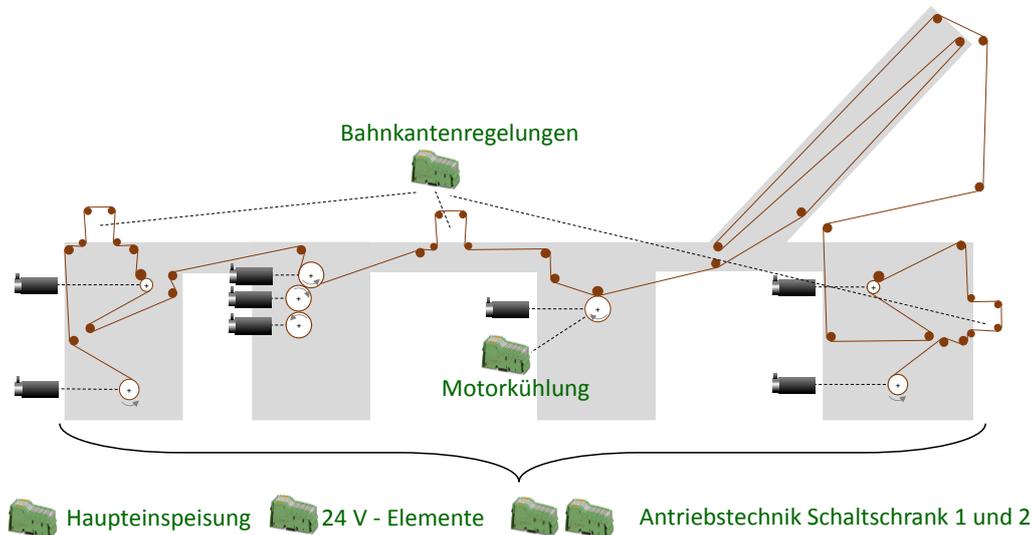
Table 1: Übersicht der während der Projektlaufzeit geleisteten Arbeitspakete.

AP	Beschreibung	2015	2016	2017
		06 07 08 09 10 11 12	01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12	01 02 03
AP1	Schaffung der Infrastruktur			
1.1	Verbraucher kategorisieren Recherche zum Stand der Technik: Bekannte Modelle aus anderen Branchen Auflistung aller Verbraucher aller Maschinenebenen (LaborMAN/LithoMAN) Voruntersuchungen mit Netzanalysator Auswahl geeigneter Energiemesstechnik Konzepterarbeitung für Energiemessung Kauf geeigneter Energiemesstechnik Hardwarentage besprechen Montage für Hardware vorbereiten (Chemnitz)	06-07, 08-09, 09-10, 10-11, 11-12		
1.2	Energiemanagement integrieren Einsatz 4EE konzipieren 4EE FB s ausprogrammieren		01-02, 03-04, 05-06, 07-08	
1.3	Energiemessklemmen installieren Hardware montieren (Chemnitz)		01-02, 03-04, 05-06, 07-08	
1.4	Testlauf Test der neuen Messinfrastruktur, Kontrolle mittels Netzanalysator und Strommesszange		01-02, 03-04, 05-06, 07-08	
MS1	Infrastruktur als Grundlage für Energiemanagement		01-02, 03-04, 05-06, 07-08	
AP2	Ermittlung der Energieverbräuche			
2.1	Aufbau / Implementierung der Energiemesstechnik bei Jungfer Maschinenkonfiguration bei Jungfer als Grundlage für Labormaschine	06-07, 08-09, 09-10, 10-11, 11-12		
2.2	Energiemessung Festlegen der Betriebsmodi und Randbedingungen für Energiemessung Konzept zum Einsatz des Data Analytics Server von Bosch Rexroth (DAS) Beschaffung des DAS bei Bosch Rexroth Aufbau eines Servers zur Installation des DAS Konfiguration des DAS Auflistung zu untersuchender Prozessparameter Messtechnische Analyse der Einflussgröße an LaborMAN	01-02, 03-04, 05-06, 07-08, 09-10, 10-11, 11-12	01-02, 03-04, 05-06, 07-08, 09-10, 10-11, 11-12	
MS2	IST-Analyse mit Identifikation der größten Verbraucher		01-02, 03-04, 05-06, 07-08, 09-10, 10-11, 11-12	
AP3	Untersuchung der Einflussparameter			
3.1	Messungen auf Laborebene Einschränkung der Parameterliste Messung an LaborMAN unter Variation ausgewählter Parameter		01-02, 03-04, 05-06, 07-08, 09-10, 10-11, 11-12	
3.2	Auswertung der Messdaten Parameterbasierte Abhängigkeit des Energieverbrauchs Validierung an Produktionsmaschine		01-02, 03-04, 05-06, 07-08, 09-10, 10-11, 11-12	
3.3	Umsetzung Messmethodik an LithoMAN Gesamtenergiemessung LithoMAN Untersuchung ausgewählter Parameter Analyse Messdaten, Vergleich mit Labormaschine		01-02, 03-04, 05-06, 07-08, 09-10, 10-11, 11-12	
MS3	Erkenntnisse über Einsparpotential und energetische Zusammenhänge		01-02, 03-04, 05-06, 07-08, 09-10, 10-11, 11-12	01-02, 03

direkt angetrieben. Das erste Druckwerk besteht aus drei rotierenden Zylindern, welche je einen Antrieb besitzen. Somit befinden sich in Summe acht direkt wirkende Einzelantriebe in der *LaborMAN II*. Direktantriebe zeichnen sich durch einen höheren Wirkungsgrad aus, da Verluste durch Getriebe oder Riemen entfallen. Das erste Druckwerk wird im Prozess als Flexodruckwerk genutzt. In seiner Konfiguration entspricht es allerdings einem Offsetdruckwerk mit drei gleich großen Zylindern. Das zweite Druckwerk ist ein Tiefdruckwerk. In jedem Bahnabschnitt kann die wirkende Bahnzugkraft mittels Sensorwalzen gemessen werden. Die Anlage wurde 2014 von der *MAURER SERVICES GmbH* steuerungsseitig generalüberholt und befindet sich auf dem aktuellen Stand der Technik.

Bei der zweiten Versuchsanlage handelt es sich um eine 48Seiten *LITHOMAN IV* der *manroland AG*. Diese Illustrationsrollenoffsetdruckmaschine erhielt 2015 einen kompletten Retrofit durch die *MAURER SERVICES GmbH* und ist seit September 2015 bei der *Jungfer Druckerei und Verlag GmbH* in Produktion. Die Maschine besteht aus Abwickler, Einzugwerk, vier Druckeinheiten, Fangvorrichtung, Trockner, Kühlwalzenständer, Falzapparat-Überbau und Falzapparat. Die Anlage weist 25 angetriebene Achsen und 17 Einzelantriebe auf.

Diese zwei antriebs- und steuerungstechnisch identischen Maschinen bilden die Aktionsplattform der experimentellen Versuche des Forschungsvorhabens. Grundvoraussetzung für die Generierung aussagekräftiger Kenngrößen ist die Schaffung einer geeigneten Infrastruktur. Hardwareseitig wurde geeignete Energiemesstechnik in die Druckmaschine integriert, bestehend aus Buskoppler, Leistungsmessklemmen, Rogowski-Spulen mit entsprechenden Messverstärkern und analogen Eingabeklemmen, Abbildung 4.



Erklärung:

-  direktes Auslesen der IndraDrive-Antriebstechnik
-  interne Messung mittels Leistungsmessklemme im Sercos-Ring
-  Überprüfung durch externe Messung mittels Netzanalysator

Abbildung 4: Integration der Energiemesstechnik in die Labordruckmaschine *LaborMAN II*.

Softwareseitig wurden von der *Bosch Rexroth AG* auf Maschinenebene geeignete Energiebibliotheken, welche die Technologiefunktionen des Energy Efficient Managements (4EE-Systematik) enthalten, bereitgestellt. Die Maschinensoftware wurde derart angepasst, dass die Energiedaten der über Energiemesstechnik verbundenen Verbraucher in frei definierbaren Intervallen ausgegeben werden konnten.

Zur Speicherung der Energiedaten wurde von der *Bosch Rexroth AG* ein sogenannter Data Analysis Server (*DAS*) zur Verfügung gestellt, Abbildung 5.

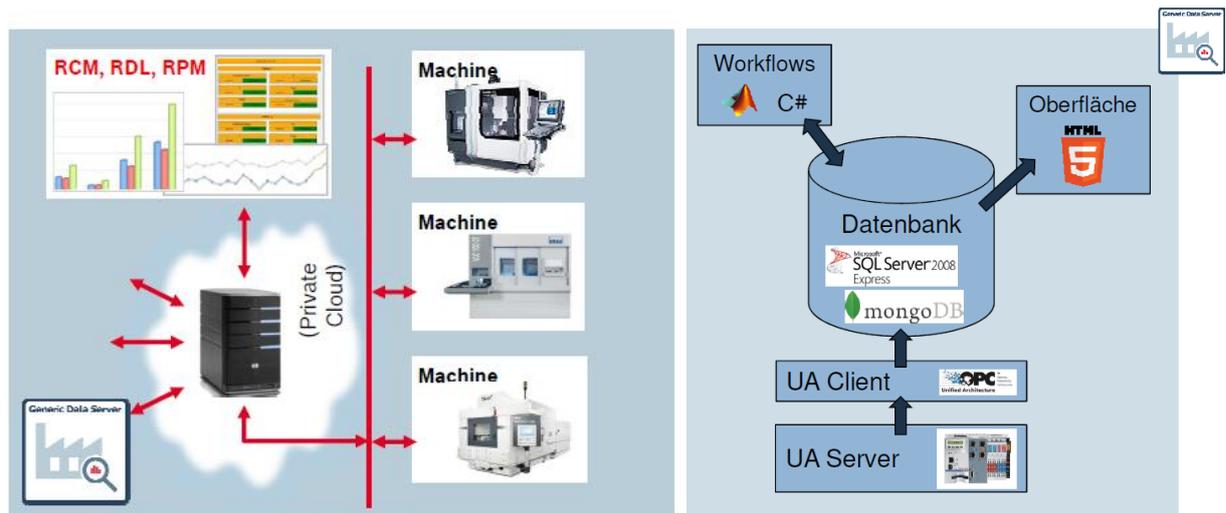


Abbildung 5: Data Analysis Server (*DAS*) der *Bosch Rexroth AG* als zentrales Speicher- und Verwaltungsorgan der Energiemessung.

Das System ist – im Sinne von Industrie 4.0 – in der Lage, mehrere Maschinen einer Produktionslinie parallel zu erfassen. Die Speicherung der Versuchsdaten erfolgt in einer mongoDB-Datenbank. Über die Weboberfläche kann der Nutzer einen individuellen Workflow definieren, der Mess- und Prozessdaten über OPC/UA von der Maschinensteuerung abrufen, über vordefinierte mathematische Methoden verarbeiten und in einer selbstkonfigurierten Tabelle ablegen kann. Die Weboberfläche bietet ebenfalls die Möglichkeit der Visualisierung und schnellen Analyse der Messdaten sowie eine Anbindung an MATLAB und C# als Option zur detaillierteren Datenverarbeitung.

Mit der Integration der hardware- und softwareseitigen Energiemesstechnik steht für die messtechnischen Untersuchungen ein vollständiges Energie-Monitoring System zur Verfügung, mit welchem alle auswertungstechnisch relevanten Messgrößen der Druckmaschine(n) in frei definierbarer zeitlicher Auflösung gespeichert, berechnet, visualisiert und analysiert werden können. Die wissenschaftliche Auswertung und Aufbereitung der Daten erfolgt extern, z. B. über MATLAB.

Nach erfolgter Schaffung der Infrastruktur und Überprüfung mittels Netzanalysator und Strommesszangen erfolgte die messtechnische Untersuchung der Energieverbräuche der Druckmaschine für verschiedene Maschinenzustände und Variation von grundlegenden Ver-

suchsparemetern. Eine übersichtliche Zusammenstellung der experimentellen Versuche ist in Abbildung 6 zu sehen.

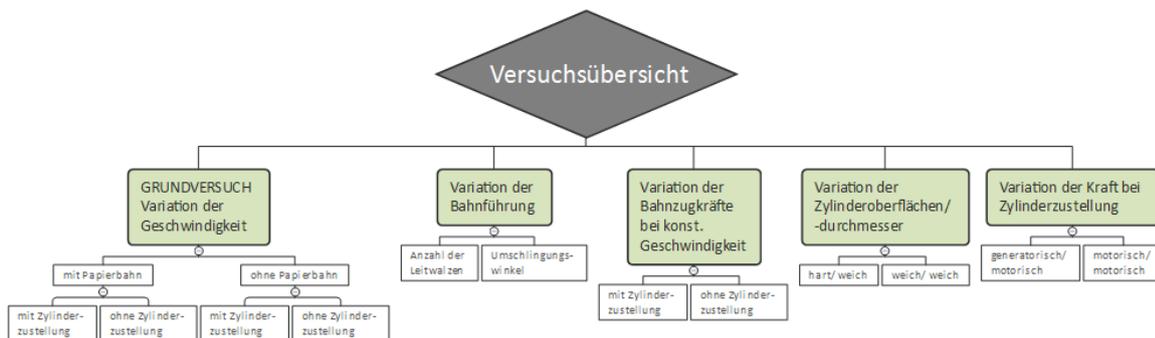


Abbildung 6: Versuchsübersicht, Projekt-Nr. 32092/01.

Beim Grundversuch wird die Maschinengeschwindigkeit (Leitachsgeschwindigkeit) in festgelegten zeitlichen Intervallen stufenweise erhöht, charakteristisch für diese Maschine von 0,5 m/s in 0,5 m/s-Schritten bis zur Maximalgeschwindigkeit von 3,0 m/s und anschließender stufenweisen Geschwindigkeitsverringierung. Zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit wurde die stufenweise Änderung der Maschinengeschwindigkeiten jeweils mehrere Male durchlaufen, Abbildung 7.

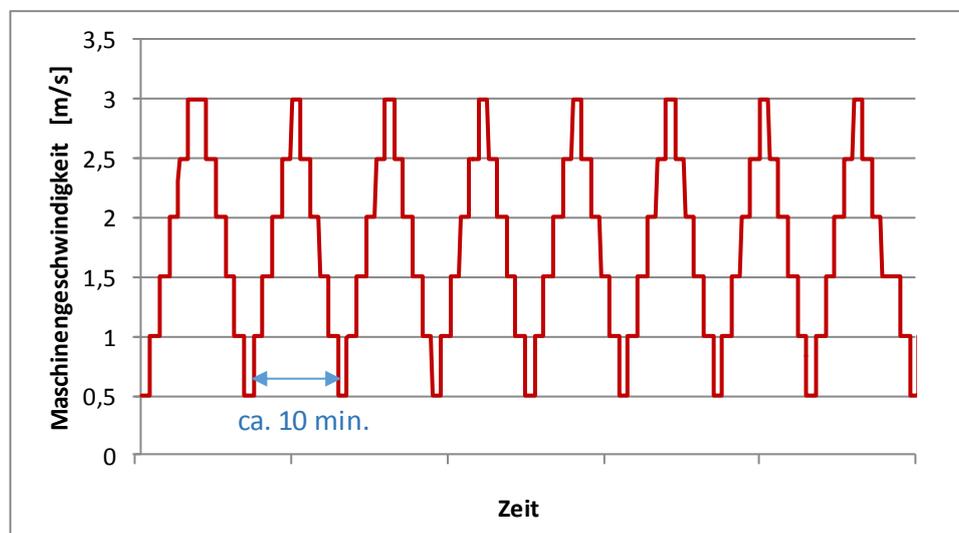


Abbildung 7: Geschwindigkeitsprofil im Grundversuch, LaborMAN II.

Mit diesem definierten Geschwindigkeitsprofil wurden unterschiedliche Bahnführungen, Bahnzugkräfte, Zylinderoberflächen bzw. -durchmesser sowie Zylinderzustellungen untersucht. Die Versuchsreihen dienen dazu, ein Grundverständnis über energetische Zusammenhänge in einer Druckmaschine zu gewinnen und die Ergebnisse in das Maschinenmodell zu übertragen. Anhand der Grundversuche können energetische Abhängigkeiten der Einzelverbraucher in Abhängigkeit des Maschinenmodus aufgezeigt werden.

Das für Druckmaschinen entwickelte Energiemodell lehnt sich an ein Modell für Werkzeugmaschinen an, [7], und ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Druckmaschine im Grundmodell ist aus den Einzelverbrauchern Motorkühlung, Trockner, 24-Volt-Verbraucher, Bahnpositionierung, Asynchronmotoren, Synchronmotoren und sonstige Verbraucher zusammengesetzt. Im Bereich der Antriebstechnik wird darüber hinaus noch in Synchronmotoren und Asynchronmotoren unterschieden. Unterschiedliche Maschinenzustände, wie z. B. *Hauptschalter ein*, *Standby*, *Ready for Production (R4P)* und die eigentliche *Produktion* werden berücksichtigt. Die Analyse des Verbrauchsverhaltens hinsichtlich Energie und Medien kann um viele unterschiedliche Parameter erweitert werden. Die erste Erweiterung umfasst grundlegende Prozessparameter, wie z. B. Geschwindigkeit, Pressung usw. In der folgenden Ausbaustufe können erweiterte Prozessparameter von beteiligten Materialien wie Farben, Gummitücher usw., berücksichtigt werden. Unterhalb des Energiemodells ist das Verbraucher-Schema der *LaborMAN II*, in Papierlaufrichtung, dargestellt. Die verwendeten Abkürzungen werden in der Legende erklärt.

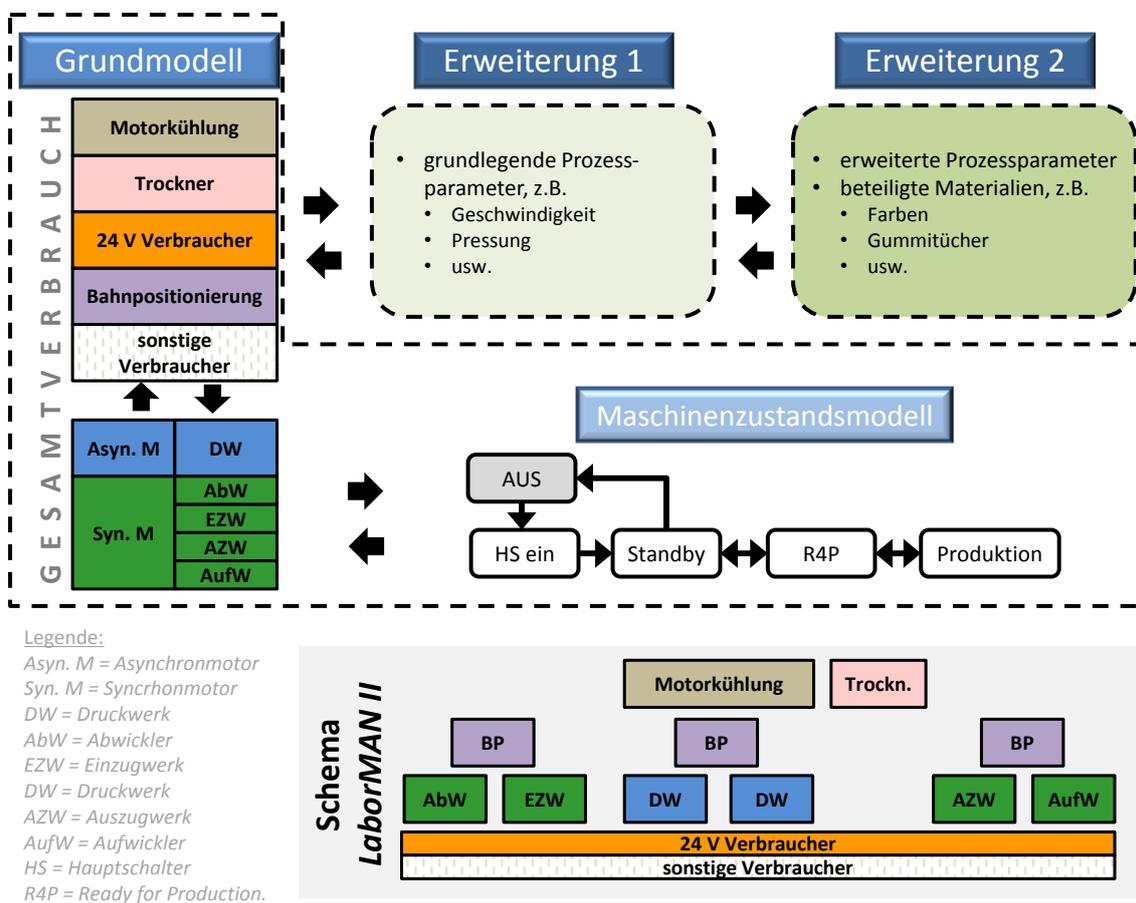


Abbildung 8: Energiemodell für Druckmaschinen mit Schema der Labordruckmaschine LaborMAN II.

Nachfolgend sollen die experimentellen Versuchsreihen beschrieben sowie deren Ergebnisse detailliert analysiert werden.

2.1 ENERGIEVERBRAUCH FÜR UNTERSCHIEDLICHE MASCHINENZUSTÄNDE DER *LABORMAN II*

Für einen gutes Verständnis der Labordruckmaschine ist es zunächst notwendig, das Grundverhalten bei unterschiedlichen Maschinentzuständen genau zu kennen. Hierzu zählen die Grundzustände Hauptschalter ein (*HS EIN*), *Standby*, *Ready for Production (R4P)* sowie die eigentliche *Produktion*. Der gemessene Wirkleistungswert für die unterschiedlichen Druckmaschinentzustände ist in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Gemessene Wirkleistungen der LaborMAN II in unterschiedlichen Grundmaschinentzuständen.

Maschinentzustand	Beschreibung	Wirkleistung [W]
<i>AUS</i>		0
<i>HS EIN</i>	Konstantverbraucher z. B. 24 V Verbraucher, Displays usw.)	500
<i>Standby</i>	Konstantverbraucher z. B. 24V Verbraucher, Displays usw.)	500
<i>R4P</i>	Antriebe bestromt und momentenbehaftet, Wicklerantriebe straffen Bahn Konstantverbraucher (z. B. 24V, Displays)	870

Aus der Zusammenstellung fällt auf, dass die gemessenen Wirkleistungen und somit die Energieverbräuche in den Maschinentzuständen „*HS EIN*“ und „*Standby*“ identisch sind. In beiden Grundzuständen wird eine Wirkleistungsaufnahme von ca. 500 Watt gemessen, welche hauptsächlich aus der Stromversorgung der Konstant-Verbraucher resultiert. Hierzu zählen 24-Volt-Verbraucher wie Netzteile, Displays und sonstige Kleinverbraucher, welche mit dem Einschalten aktiviert werden. Diese Verbrauchergruppen werden von der Maschinensteuerung auch im Zustand „*Standby*“ nicht ausgeschaltet.

In der Konfiguration „*R4P*“ werden zusätzlich zu den Konstant-Verbrauchern die Antriebe bestromt. Die Wicklerantriebe spannen darüber hinaus die Papierbahn auf die voreingestellten Werte. Der Leistungsbedarf steigt dabei um 370 Watt oder umgerechnet um ca. 75 % im Vergleich zu den Grundzuständen „*HS EIN*“ bzw. „*Standby*“ an.

2.2 UNTERSCHIEDLICHE PRESSUNGSZUSTÄNDE IN BEIDEN DRUCKWERKEN MIT PAPIERBAHN (GRUNDVERSUCH)

Zur Vervollständigung der bisher behandelten Maschinenzustände, Abbildung 8 oder Tabelle 2, fehlt noch der Grundzustand der *Produktion*. In diesem Grundzustand wird der Energieverbrauch der Gesamtmaschine von vielen Parametern beeinflusst, u.a. den eingestellten Produktionsbedingungen sowie mehreren Druckparametern, um ein optimales, qualitativ hochwertiges Druckprodukt zu erhalten.

Um eine eindeutige Zuordnung von Energieverbräuchen zu Einflussparametern erstellen zu können, ist die Festlegung einer Referenzkonfiguration für den Zustand „*Produktion*“ erforderlich. Die Maschineneinstellungen für den Referenzzustand sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Maschineneinstellungen der LaborMAN II im Referenzzustand „*Produktion*“.

Maschineneinstellung / -parameter	Beschreibung
Druckwerke: pressungsfrei „ <i>Druck ab</i> “	offener Druckspalt im Flexo-Druckwerk als auch im Tiefdruckwerk
Maschinen- / Leitachsgeschwindigkeit	3,0 m/s (entspricht Maximalgeschwindigkeit beim Druckprozess)
Papierlauf / Bahntransport	mit Papierlauf, Papier mit 60 g/m ² und einer Breite von 140 mm
eingestellte Bahnspannungen	drucktypisch <i>LaborMAN II</i> (Ab- und Aufwickler 35 N; Einzug- und Auszugwerk: 25 N; ergibt ca. 25 N resultierende Zugkraft in den Druckwerken)
Systemtemperatur	betriebswarm

Die Festlegung der Maschinenparameter bzw. -einstellungen und einer Maschinen- bzw. Leitachsgeschwindigkeit führt schließlich auf einen Referenzpunkt für die *Produktion*.

Bei dieser Versuchsanordnung mit offenen Druckspalten „*Druck ab*“ in beiden Druckwerken, wird Papier mit 60 g/m² vom Abwickler durch die Maschine auf den Aufwickler gerollt und der Energieverbrauch bei unterschiedlichen Maschinengeschwindigkeiten untersucht. Während des Versuchs wird ein vollständiger Papierwickel vom Abwickler zum Aufwickler gespult. Die gesamte Versuchszeit betrug ca. 5000 Sekunden bzw. umgerechnet ca. 83 Minuten. Der gemessene Wirkleistungsverlauf der Labordruckmaschine als auch das gefahrene Geschwindigkeitsprofil sind in Abbildung 9 dargestellt.

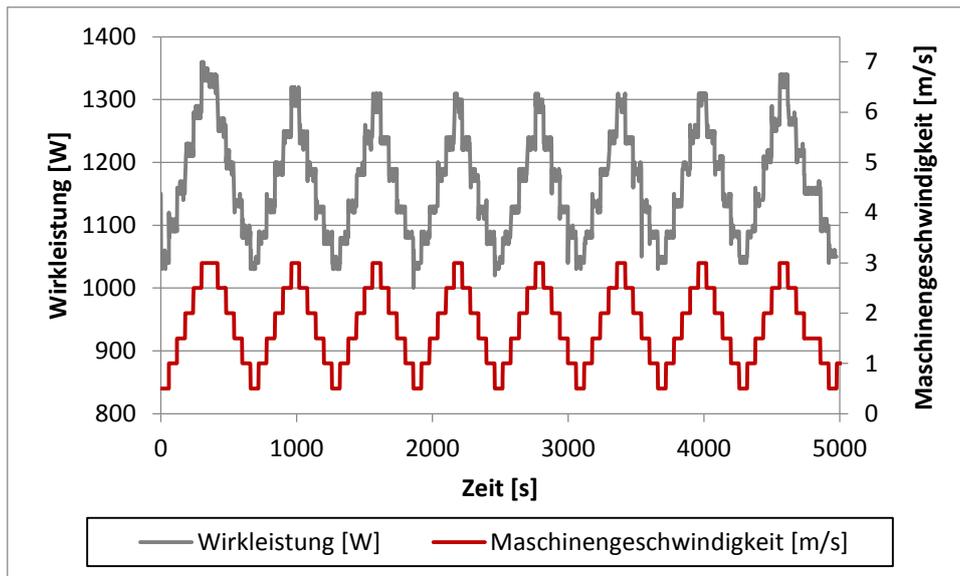


Abbildung 9: Leistungsbedarf und Geschwindigkeitsprofil der LaborMAN II im Grundversuch (bei „Druck ab“).

Auf den ersten Blick ist ersichtlich, dass der Leistungsbedarf der Druckmaschine maßgeblich von der Maschinengeschwindigkeit bzw. dem gefahrenen Geschwindigkeitsprofil beeinflusst wird. Die Wirkleistungsaufnahme verläuft synchron zur gefahrenen Maschinengeschwindigkeit und liegt je nach Geschwindigkeit zwischen ca. 1030 Watt bei geringster Maschinengeschwindigkeit und maximal ca. 1340 Watt bei maximaler Geschwindigkeit. Wichtige charakteristische Verbrauchskennwerte können durch Mittelwertbildung berechnet und schließlich miteinander verglichen werden.

In einem weiteren Versuch wurde ein identisches Geschwindigkeitsprofil durchfahren, wobei beide Druckwerke mit drucktypischen Einstellungen „Druck an“ betrieben wurden. Das bedeutet, dass der Presseur im Tiefdruckwerk mit einem Druck von 2 bar pneumatisch angestellt wurde, welcher zwischen den Zylindern auf einer Breite von 140 Millimetern wirkt. Am Flexodruckwerk wurde durch die Begrenzung der Exzenterhublänge eine drucktypische Konfiguration „Druck an“ eingestellt. Diese Konfiguration ist unter der Bezeichnung „Kiss-Print“ bekannt.

Zunächst sollen charakteristische Wirkleistungskennwerte bei maschinentypischen Geschwindigkeiten im Zeitbereich betrachtet werden. Punkte identischer Geschwindigkeiten sind hierbei durch Linien verbunden. Bei den Maschinengeschwindigkeiten von 1 m/s sowie 2 m/s wird zusätzlich unterschieden, ob die Verbrauchswerte im Geschwindigkeitsprofil in der ansteigenden (a) oder absteigenden Phase (e) berechnet wurden, Abbildung 10.

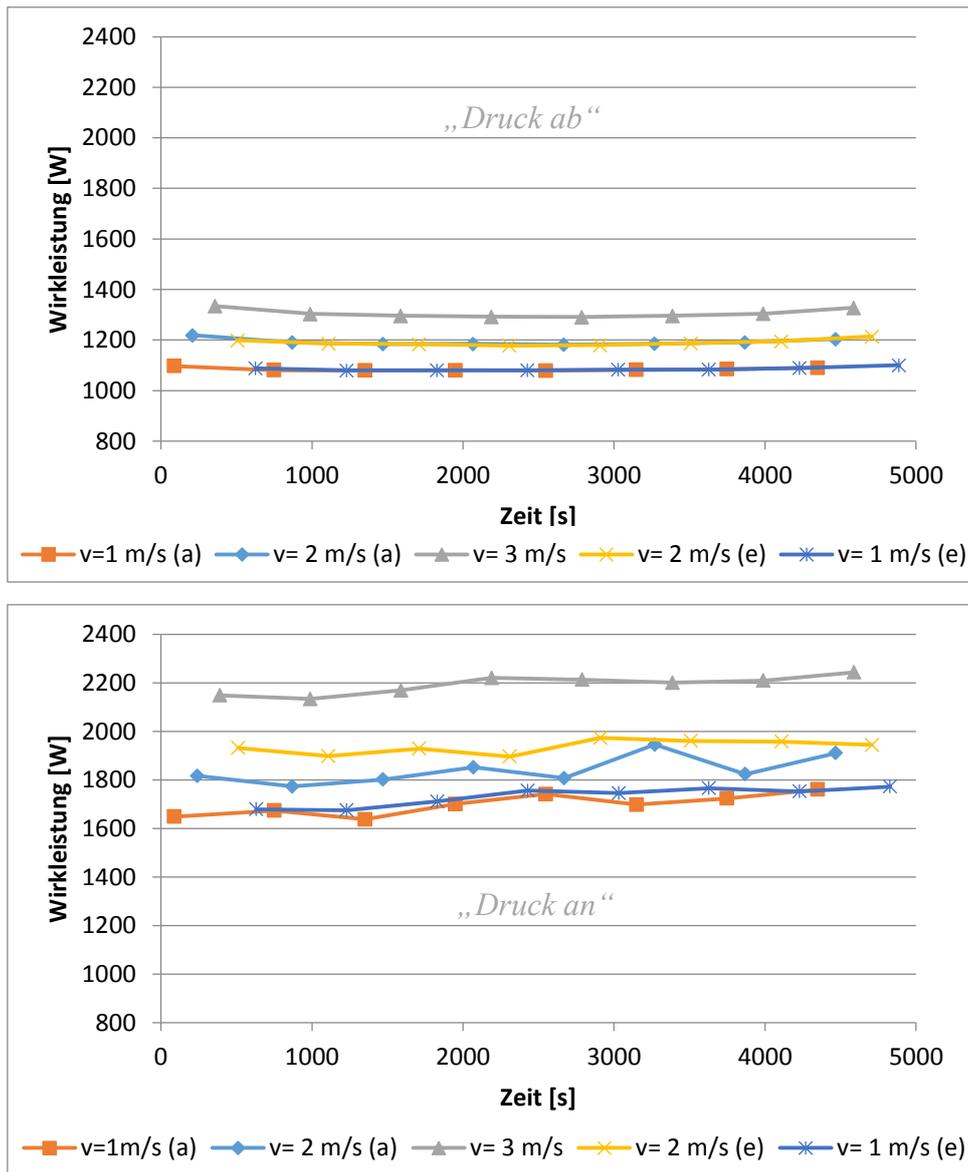


Abbildung 10: Wirkleistungsverläufe der LaborMAN II über der Zeit bei „Druck ab“ (oben) und bei „Druck an“ (unten) in beiden Druckwerken.

Das obere Diagramm zeigt die „Druck ab“ Konfiguration, deren Wirkleistungsverlauf und Geschwindigkeitsprofil bereits in Abbildung 9 dargestellt wurde. Darin ist ersichtlich, dass die berechneten Wirkleistungsmittelwerte für die Leitachsgeschwindigkeiten von 1 und 2 m/s jeweils sehr gut miteinander übereinstimmen, unabhängig davon, ob die Mittelwerte in den Phasen ansteigender oder abnehmender Geschwindigkeiten berechnet wurden. Die Leistungsmittelwerte sind bei höheren Maschinengeschwindigkeiten größer im Vergleich zu den Leistungskennwerten bei geringeren Geschwindigkeiten. Der dritte erkennbare Effekt im oberen Diagramm ist, dass die bei konstanten Geschwindigkeiten berechneten Wirkleistungsmittelwerte über der Versuchszeit parabelförmig ausgeprägte Verläufe aufweisen. Das bedeutet, dass die Leistungswerte zu Versuchsbeginn und gegen Versuchsende im Vergleich zur Versuchsmitte höher liegen. Es wird angenommen, dass dieser Effekt hauptsächlich aus Trägheitseffekten im Bereich der Antriebe der Wickler hervorgerufen wird. Dieser Aspekt

wird in Abschnitt 2.6 nochmals detailliert betrachtet. Im Betrieb beider Druckwerke unter „*Druck ab*“ besteht eine ausgezeichnete Reproduzierbarkeit der Verbrauchsgrößen bei gleichen Geschwindigkeiten.

Bei „*Druck an*“ sowohl im Tiefdruckwerk als auch im Flexodruckwerk ergeben sich über der Versuchszeit betrachtete stark veränderte Leistungscharakteristika, Abbildung 10 unten. Die bei „*Druck ab*“ festgestellten, parabelförmig über der Versuchszeit ausgeprägten Leistungsverläufe, sind bei „*Druck an*“ nicht erkennbar. Die Ursache hierfür liegt darin begründet, dass die von den Antriebsmotoren des Flexodruckwerks ausgelesenen Leistungsdaten sehr stark oszillierende Verbrauchswerte aufweisen.

Beim Abrollen der drei Flexo-Druckwerkszylinder aufeinander unter „*Druck an*“ führen schon geringe Durchmesserunterschiede zu Relativgeschwindigkeiten zwischen den Zylindern. Dabei wird einer der Zylinder im Druckspalt abgebremst bzw. beschleunigt. Dem wirkt die Maschinensteuerung entgegen. Hierbei entstehen signaltechnisch transiente Beschleunigungen und Verzögerungen, welche sich in stark oszillierenden Leistungswerten äußern. Die Leistungskennwerte lassen sich durch Mittelwertbildung dennoch recht zuverlässig auswerten.

Die Gesamtleistungsaufnahme bei „*Druck an*“ ist im Vergleich zu „*Druck ab*“ merklich gestiegen. Bei einer Leitachsgeschwindigkeit von 1 m/s ergibt sich ein Mehrleistungsbedarf von ca. 600 Watt, bei der höchsten Geschwindigkeitsstufe beträgt die durchschnittliche Mehrleistung ca. 900 Watt.

Abbildung 11 verdeutlicht die direkte Gegenüberstellung der Wirkleistungskenngrößen in Abhängigkeit der Leitachsgeschwindigkeit beider Konfigurationen.

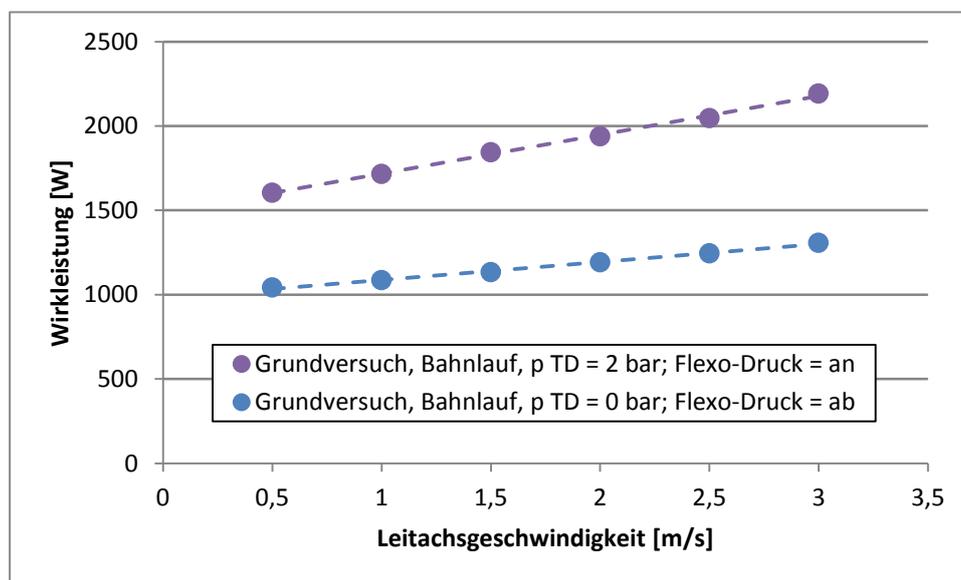


Abbildung 11: Leistungsbedarf der LaborMAN II für unterschiedliche Betriebsmodi beider Druckwerke „*Druck ab*“/„*Druck an*“ mit Bahntransport.

Bei beiden Konfigurationen wird ein Anstieg des Leistungsbedarfs mit zunehmender Leitachsgeschwindigkeit gemessen. Bei „*Druck ab*“ in beiden Druckwerken nimmt die Wirkleistung, ausgehend von ca. 1040 Watt bei 0,5 m/s auf ca. 1310 Watt bei höchster Geschwindigkeit zu. Dies entspricht einer Mehrleistung von 270 Watt. Zwischen Maschinengeschwindigkeit und Leistungsaufnahme ergibt sich in sehr guter Näherung eine lineare Abhängigkeit.

Bei „*Druck an*“ wird bei geringster Leitachsgeschwindigkeit eine Wirkleistung von ca. 1600 Watt gemessen. Die Leistungsaufnahme steigt ebenfalls linear mit zunehmender Leitachsgeschwindigkeit an. Bei 3 m/s beträgt die gemessene Wirkleistung ca. 2200 Watt. Dabei ist zu erkennen, dass der Anstieg der Geraden steiler verläuft als bei „*Druck ab*“. Somit ist die Mehrleistung, welche bei „*Druck an*“ im Tiefdruck- und Flexodruckwerk zusätzlich aufzuwenden ist, ebenfalls geschwindigkeitsabhängig.

2.3 UNTERSCHIEDLICHE PRESSUNGSZUSTÄNDE IN BEIDEN DRUCKWERKEN OHNE PAPIERBAHN

In Analogie zu den Versuchen mit unterschiedlichen Betriebsmodi der Druckwerke mit Bahntransport wurden die gleichen Druckwerk-Einstellungen ohne Bahntransport untersucht. Dabei wurden identische Geschwindigkeitsprofile durchfahren.

Die gemessenen Gesamtwirkleistungsverläufe beider Konfigurationen in Abhängigkeit der Leitachsgeschwindigkeit ohne aktiven Bahntransport sind in Abbildung 12 dargestellt.

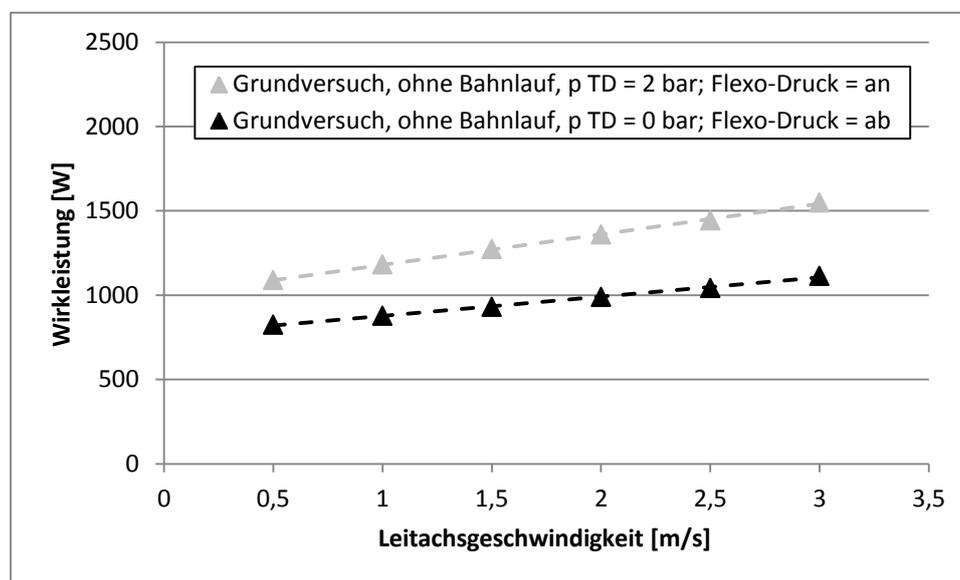


Abbildung 12: Leistungsbedarf der LaborMAN II für unterschiedliche Betriebsmodi beider Druckwerke „*Druck ab*“, „*Druck an*“ ohne Bahntransport.

Erwartungsgemäß liegen die bei „*Druck ab*“ gemessenen Wirkleistungen unterhalb der Wirkleistungswerte, welche bei „*Druck an*“ gemessen werden. Bei geringster Leitachsge-

schwindigkeit beträgt die mittlere Wirkleistung bei „*Druck ab*“ ca. 825 Watt. Mit „*Druck an*“ steigt der Leistungsbedarf um ca. 260 Watt. In beiden Konstellationen ist zu erkennen, dass der Leistungsbedarf linear mit der Maschinengeschwindigkeit ansteigt. Der Verlauf bei „*Druck an*“ weist eine größere Steigung auf. Bei maximaler Geschwindigkeit ergeben sich Wirkleistungswerte von ca. 1110 Watt bzw. ca. 1550 Watt bei „*Druck ab*“ bzw. „*Druck an*“.

Mittels eines erweiterten Vergleichs der bisherigen Versuchsreihen lassen sich wichtige charakteristische Einflüsse auf den Leistungsbedarf und somit Energieverbrauch der *LaborMAN II* ableiten. Der Einfluss des Bahntransports lässt sich aus der direkten Gegenüberstellung der Wirkleistungsverläufe mit und ohne Bahnlauf sowohl für „*Druck ab*“ als auch für „*Druck an*“ berechnen, Abbildung 13. Der Energieverbrauch der Wickelachsen ist abhängig vom wirkenden Trägheitsmoment, der Bahngeschwindigkeit bzw. der resultierenden Wickelgeschwindigkeit und der eingestellten Bahnspannung. Die Antriebsleistung der Wickelachsen kann ohne Papiertransport nicht sinnvoll gemessen werden, da für den Betrieb der Wickler ein Feedback der Sensorwalzen erforderlich ist. Ohne dieses Feedback würden die Wickler entsprechend der eingestellten Regelung bis zur Maximalgeschwindigkeit beschleunigen. Aus diesem Grund werden die Leistungsanteile von Auf- und Abwicklern bei der Differenzbildung nicht berücksichtigt. Die Unterschiede mit zu ohne Bahnlauf beinhalten damit nur die Anteile der Zug- und Druckwerke.

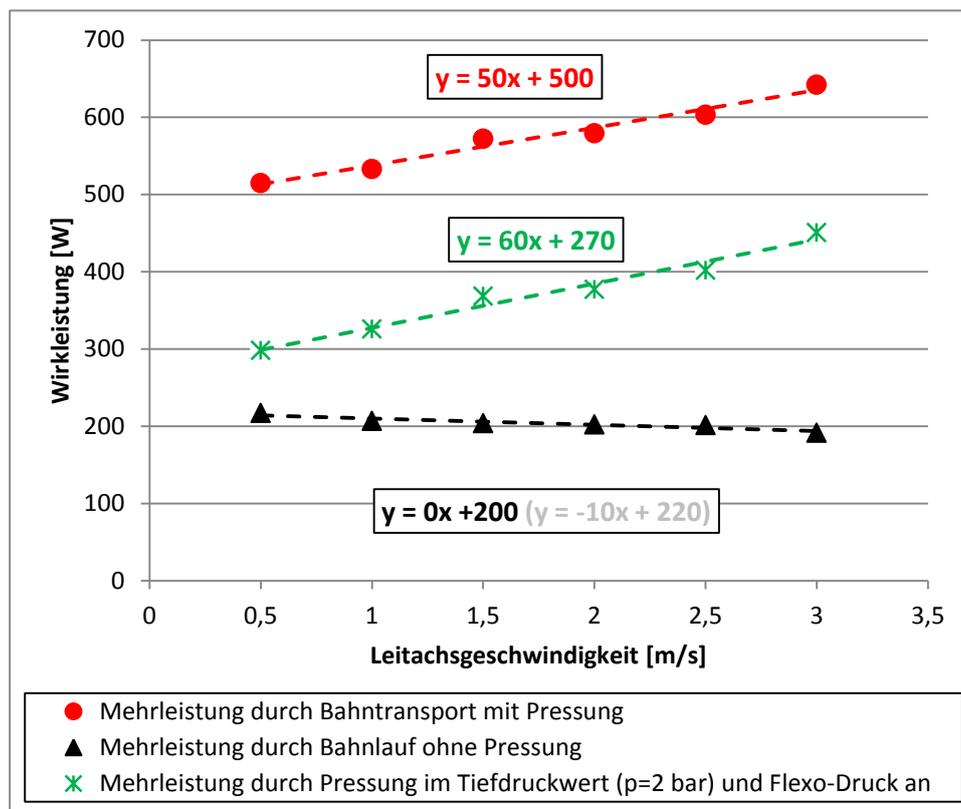


Abbildung 13: Einfluss des Bahntransports auf Zug- und Druckwerke der *LaborMAN II* bei unterschiedlichen Betriebsmodi „*Druck ab*“/ „*Druck an*“.

Die aufzuwendende Leistung für den Bahnlauf lässt sich für beide Betriebsmodi für jeweils identische Leitachsgeschwindigkeiten aus der Differenz der gemessenen Wirkleistungsmittelwerte mit und ohne Bahnlauf berechnen. Für „*Druck ab*“ ergibt sich für den Bahnlauf über dem gesamten geprüften Leitachsgeschwindigkeitsbereich ein annähernd konstant verlaufender zusätzlicher Leistungsbedarf von ca. 200 Watt. Bei „*Druck an*“ mit Bahnlauf berechnet sich bei 0,5 m/s eine Mehrleistung von ca. 525 Watt. Mit zunehmender Leitachsgeschwindigkeit erhöht sich die zusätzlich aufzuwendende Wirkleistung für den Bahnlauf um ca. 50 Watt pro Meter pro Sekunde Leitachsgeschwindigkeit. Der Einfluss der Betriebsmodi ist ebenfalls linear abhängig von der Leitachsgeschwindigkeit. Der Wirkleistungsunterschied beträgt bei 0,5 m/s ca. 300 Watt und steigt mit ebenfalls mit zunehmender Geschwindigkeit an. Bei 3 m/s wird eine Mehrleistung von ca. 450 Watt berechnet. Die funktionalen Zusammenhänge sind in Form der Geradengleichungen im Diagramm angegeben.

2.4 UNTERSCHIEDLICHE PRESSUNGSZUSTÄNDE ZWISCHEN GENERATORISCHER UND MOTORISCHER AXSE IM TIEFDRUCKWERK OHNE PAPIERBAHN

Bei dieser Versuchsreihe wurden die Drücke am Presseur (Tiefdruckwerk) schrittweise von 0,5 bar auf 5 bar in 0,5 bar-Schritten erhöht. Die Einstellungen am Tiefdruck-Druckwerk entsprechen vom Prinzip her der „*Druck an*“ Konfiguration mit variierenden Anpressdrücken des Presseurs. Für jeden eingestellten Druckzustand wurden die Leitachsgeschwindigkeiten, beginnend von 0,5 m/ in 0,5 m/s-Schritten auf 3 m/s erhöht und entsprechend wieder reduziert, vergleiche Grundversuche, Abbildung 7. Bei diesen Variationen fand kein Bahntransport statt.

Die aufgezeichneten Messdaten dieser Versuchsreihe beinhalten lediglich die Leistungsanteile des Tiefdruckwerks sowie der Konstantverbraucher. Alle anderen Antriebe der *LaborMAN II* wurden deaktiviert. Auf diese Weise kann die Beeinflussung (Überlagerung) durch andere geschwindigkeitsabhängige Verbraucher minimiert werden. Die dargestellten Leistungsdaten sind somit rein von der Pressung im Tiefdruckwerk und der Maschinengeschwindigkeit abhängig. Als Größenordnung für die Konstantverbraucher (24-Volt-Verbraucher, Bahnkantenregelung, sonstige Verbraucher) können ca. 500 Watt angesetzt werden. Dies entspricht dem „Standby-Wert“ der Maschine, Tabelle 2.

Abbildung 14 zeigt die Entwicklung des Leistungsbedarfs für das Tiefdruckwerk und der Konstant-Verbraucher der *LaborMAN II*, in Abhängigkeit der Leitachsgeschwindigkeit und in einer zweiten Darstellung in Abhängigkeit der eingestellten Pressung am Tiefdruckwerk.

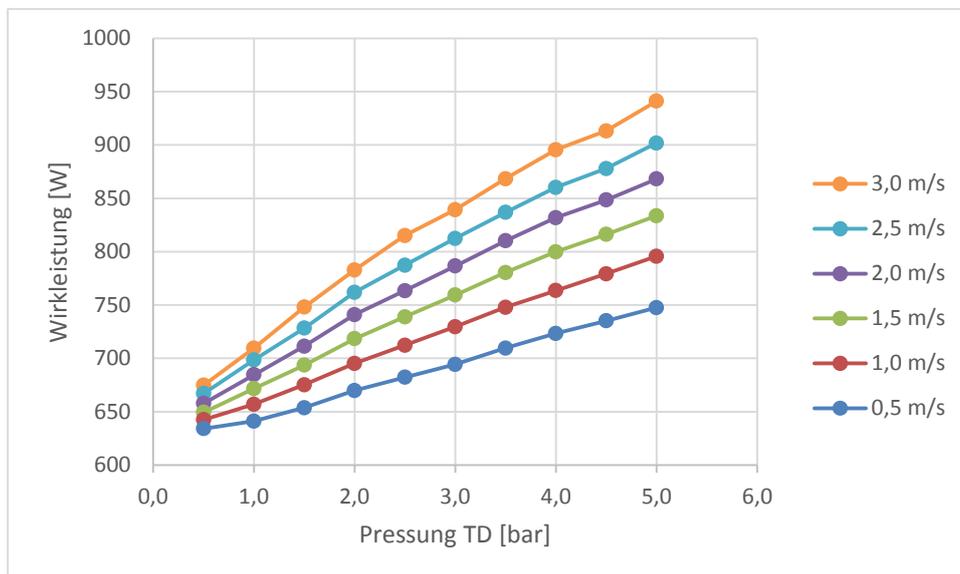
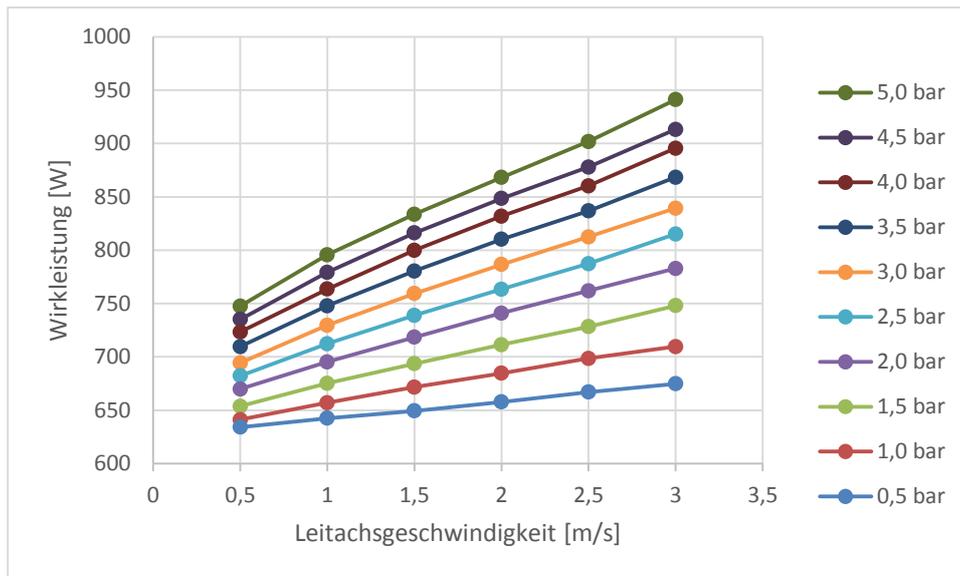


Abbildung 14: Leistungsbedarf bei *Druckänderung* zwischen generatorischer und motorischer Achse im Tiefdruck-Druckwerk bei „TD Druck an“.

Aus dem oberen Diagramm von Abbildung 14 wird ersichtlich, dass für alle aufgeführten Druckeinstellungen am Tiefdruckwerk die Gesamtleistungsaufnahme mit zunehmender Leitachsgeschwindigkeit ansteigt. Die Wirkleistungen steigen in guter Näherung linear mit zunehmender Achsgeschwindigkeit an. Eine Erhöhung der *Druck* bei gleicher Geschwindigkeit führt ebenfalls zu ansteigenden Wirkleistungen. Über der Achsgeschwindigkeit weisen die Wirkleistungsverläufe für jede höhere Druckstufe geringfügig größere Steigungen auf. Die konstanten Abstände der gemessenen Wirkleistungsmittelwerte hinsichtlich *Druck* und Achsgeschwindigkeit verdeutlichen die sehr gute Ergebnisqualität bei hoher Reproduzierbarkeit. Die Änderung des Anpressdrucks im Tiefdruck-Druckwerk von 0,5 bar auf 5 bar führt bei maximaler Leitachsgeschwindigkeit zu einer Mehrleistungsaufnahme von ca. 270 Watt.

Die gleiche Tendenz ergibt sich, wenn der Leistungsbedarf über der Pressung im Tiefdruckwerk aufgetragen wird, unteres Diagramm in Abbildung 14. Die gemessene Gesamtwirkleistung steigt mit zunehmendem Anpressdruck an. Die Steigung ist dabei umso größer, je höher die Leitachsgeschwindigkeit ist. Der funktionale Zusammenhang zwischen Wirkleistungsbedarf und Anpressdruck im Tiefdruckwerk kann ebenfalls in guter Näherung als linear angenommen werden.

Ein identischer Versuch wurde mit zusätzlich aktivierter Motorkühlung der Tiefdruckachse durchgeführt. Nach Erreichen der Solltemperatur besteht die Kühlleistung lediglich aus der statischen Grundlast. Diese weist eine stetige Leistungsaufnahme von ca. 100 Watt auf, welche durch die Aktivierung der Kühlung dynamisch um ca. 600 Watt auf einen Leistungswert von ca. 700 Watt ansteigt, Abbildung 15. Die Spitzenlast der *LaborMAN II* in dieser Versuchsanordnung betrug knapp 1550 Watt.

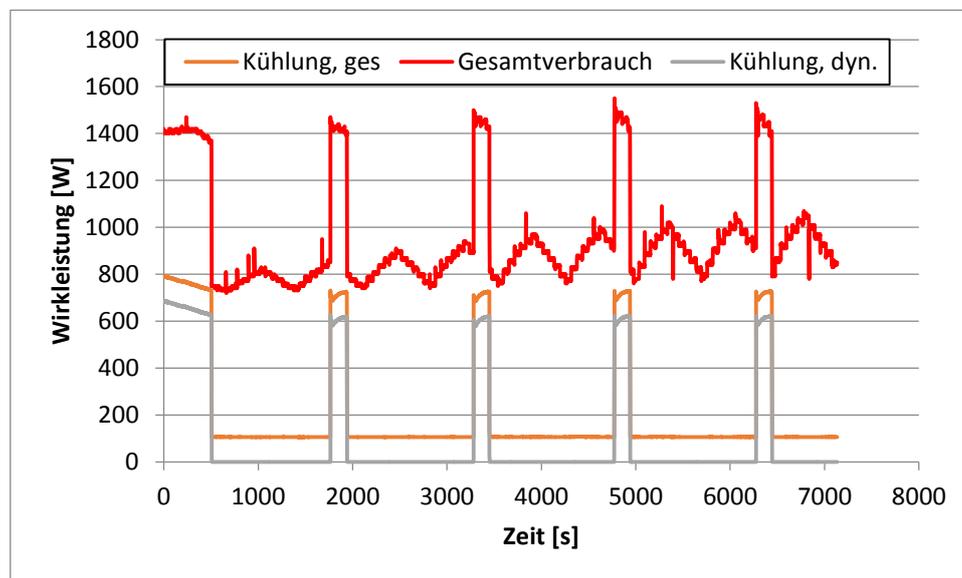


Abbildung 15: Leistungsverlauf bei Pressungsänderung zwischen generatorischer und motorischer Achse im Tiefdruck-Druckwerk bei „TD Druck an“ mit aktivierter Motorkühlung.

Der Leistungsbedarf für den „reinen“ Betrieb der Druckmaschine ohne Kühlung lässt sich demzufolge sehr gut aus dem gemessenen Gesamt-Wirkleistungsverlauf eliminieren. Der Leistungsbedarf ergibt sich aus der Differenz der Gesamtleistung und der Leistungsaufnahme der Kühlung.

Die Auswertung der Ergebnisse dieser Versuchsreihe ist in Abbildung 16 dargestellt, wobei der Einfluss der Kühlung rechnerisch eliminiert wurde.

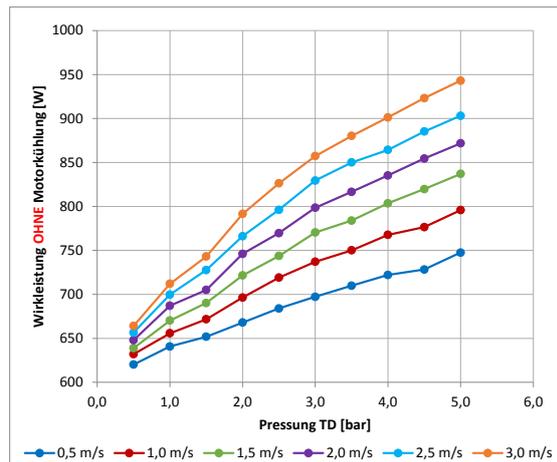
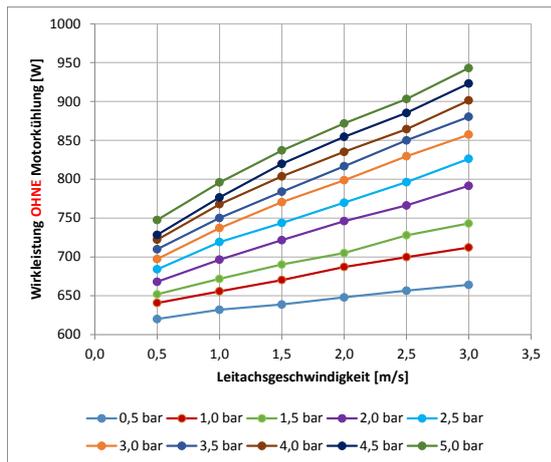


Abbildung 16: Rückrechnung des Leistungsbedarfs bei Pressungsänderung zwischen generatorischer und motorischer Achse im Tiefdruck-Druckwerk bei „TD Druck an“ ohne den Einfluss der Kühlung.

Die berechneten Wirkleistungsverläufe stimmen in sehr guter Näherung mit den Ergebnissen der Versuchsreihe ohne aktivierte Motorkühlung überein, Abbildung 14. Damit wurde gezeigt, dass Kühlungseffekte ohne die Möglichkeit der direkten messtechnischen Erfassung sehr gut aus dem gemessenen Gesamt-Leistungsverlauf herausgerechnet werden können.

2.5 ANALYSE VERSCHIEDENER PRESSUNGSZUSTÄNDE ZWISCHEN DREI MOTORISCHEN AXSEN IM FLEXODRUCKWERK

Die Versuche dieser Versuchsreihe dienen der Analyse verschiedener Pressungszustände zwischen den drei motorischen Achsen des Flexodruckwerks. Dabei besitzt jede Motorachse zur virtuellen Leitachse gleiche Getriebeeinstellungen. Identisch zum definierten Grundversuch werden auch hier für jede Einstellung die charakteristischen Geschwindigkeitsprofile durchlaufen. Als Flexodruckform wurde eine unstrukturierte Vollfläche verwendet und somit eine Konfiguration erreicht, welche mit einem Offsetdruckverfahren vergleichbar ist.

Identisch zur vorherigen Versuchsreihe, in welcher die Pressungszustände im Tiefdruckwerk variiert wurden, beinhalten die nachfolgend dargestellten Leistungsdaten lediglich die Leistungsanteile der Antriebe des Flexo-Druckwerks in verschiedenen Konfigurationen sowie der Konstant-Verbraucher.

Abbildung 17 zeigt auf der linken Seite die durchgeführten Zylinderzustellungen und rechts die ausgewerteten Versuchsergebnisse.

Variierende Zylinderzustellungen:

- keine Zustellung der Zylinder („*Druck ab*“)
- Gegendruckzylinder und Gummizylinder
- alle drei Zylinder („*Druck an*“)

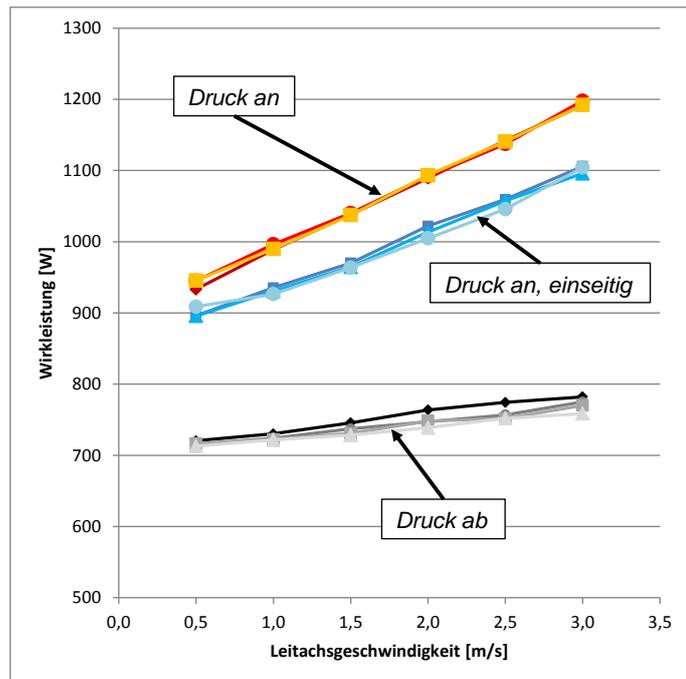
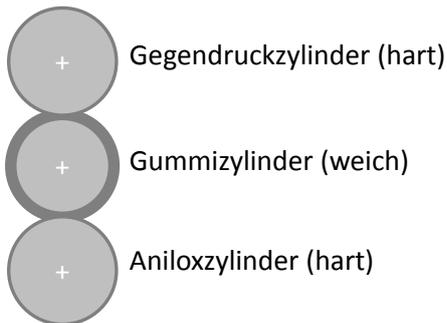


Abbildung 17: Leistungsbedarf der LaborMAN II bei verschiedenen Pressungszuständen zwischen drei motorischen Achsen im Flexodruckwerk.

Die Untersuchung der Konfiguration ohne Zylinderzustellung („*Druck ab*“) weist erwartungsgemäß den geringsten Leistungsbedarf auf. Die Wirkleistung steigt bei geringster Leitachsgeschwindigkeit von ca. 720 Watt mit zunehmender Leitachsgeschwindigkeit linear an. Bei maximaler Leitachsgeschwindigkeit von 3,0 m/s wird eine Gesamt-Wirkleistung bei ca. 780 Watt gemessen. Bei einseitiger Pressung steigt die Wirkleistung bei kleinster Achsgeschwindigkeit auf ca. 900 Watt an, was einer Differenz von ca. 180 Watt entspricht. Der Leistungsbedarf nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit ebenfalls linear zu. Im Vergleich zur „*Druck ab*“ Einstellung ist die Steigung bei einseitiger Pressung größer. Die weitere Zustellung und beidseitige Pressung „*Druck an*“ bewirkt eine nochmalige Steigerung der gemessenen Gesamt-Wirkleistungen, welche bei einer Leitachsgeschwindigkeit von 0,5 m/s ca. 950 Watt beträgt und auf bis zu ca. 1200 Watt bei maximaler Leitachsgeschwindigkeit ansteigt. Der Anstieg der Leistungszunahme ist annähernd identisch mit dem Anstieg unter einseitiger Pressung. Beidseitige Zustellung der Zylinder führt im Flexodruckwerk bei maximaler Maschinengeschwindigkeit zu einer Erhöhung der benötigten Antriebsleistung von ca. 420 Watt im Vergleich zum Betrieb mit „*Druck ab*“.

Weiterführende Untersuchungen zum Einfluss der Zustellkraft im Flexodruckwerk wurden in diesem Projektabschnitt nicht durchgeführt.

2.6 KONSTANT-GESCHWINDIGKEITS-VERSUCHE UNTER VARIATION DER BAHNZUGKRÄFTE BEI JEWEILIGER ABWICKLUNG EINES KOMPLETTEN PAPIERWICKELS

Mit dieser Versuchsreihe wurde der Einfluss der Bahnspannungen auf den Leistungsbedarf und somit auf den Gesamtenergieverbrauch gemessen und analysiert. Im Unterschied zu den bisher beschriebenen Versuchsreihen wurde hier eine konstante Maschinengeschwindigkeit von 3 m/s eingestellt, so dass über die gesamte Versuchsdauer ein kompletter Papierwickel vom Ab- auf den Aufwickler gespult wurde. In dieser Versuchsreihe wurden insgesamt sechs Versuche durchgeführt. Drei dieser Versuche wurden bei „Druck ab“ und zwei Versuche bei „Druck an“ durchlaufen.

Zusätzlich wurden die einzustellenden Zugkräfte der Wickler und Zugwerke (Infeed, Outfeed) variiert, deren Positionen im Bahnlauf in Abbildung 18 verdeutlicht sind. Die versuchsrelevanten Maschineneinstellungen sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Die aufgeführte resultierende Zugkraft entspricht der Summe der im Versuch eingestellten und zusätzlich während der Messungen überprüften Bahnzugspannungen L1, L2, L4 und L5.

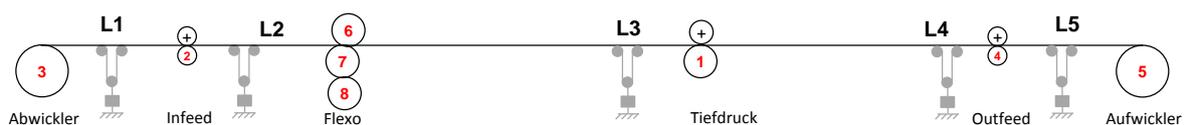


Abbildung 18: Zugkraft-Einstellung und deren Positionen im Bahnlauf der LaborMAN II.

Tabelle 4: Maschineneinstellungen der LaborMAN II bei den durchgeführten Konstant-Geschwindigkeits-Versuchen.

Bezeichnung	Flexo-DW			TD-DW			Bahnspannungen			
							L1	L2	L3	L4
V4.1	UM = aus	OM = aus	p = 0 bar	35 N	25 N	Regelfreier Bereich, Bahnspannung wird nicht eingestellt	25 N	35 N	120 N	
V4.2	UM = aus	OM = aus	p = 0 bar	35 N	40 N		40 N	45 N	160 N	
V4.3	UM = an	OM = an	p = 2 bar	35 N	40 N		40 N	45 N	160 N	
V4.4	UM = an	OM = an	p = 2 bar	35 N	25 N		25 N	35 N	120 N	
V4.5	UM = aus	OM = aus	p = 0 bar	35 N	35 N		35 N	35 N	140 N	

Abbildung 19 zeigt exemplarisch einen charakteristischen gemessenen Gesamt-Wirkleistungsverlauf bei „Druck an“ in beiden Druckwerken. Zusätzlich im Diagramm sind die Leistungsverläufe typischer Verbrauchergruppen wie 24-Volt-Elemente, Bahnkantenregelungen, Synchronmotoren und Asynchronmotoren eingezeichnet. Global, über der gesamten Versuchsdauer betrachtet, lässt sich der Gesamt-Wirkleistungsverlauf in fünf Phasen untertei-

len. Deren Aufteilung und kennzeichnende Bereichsmerkmale sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

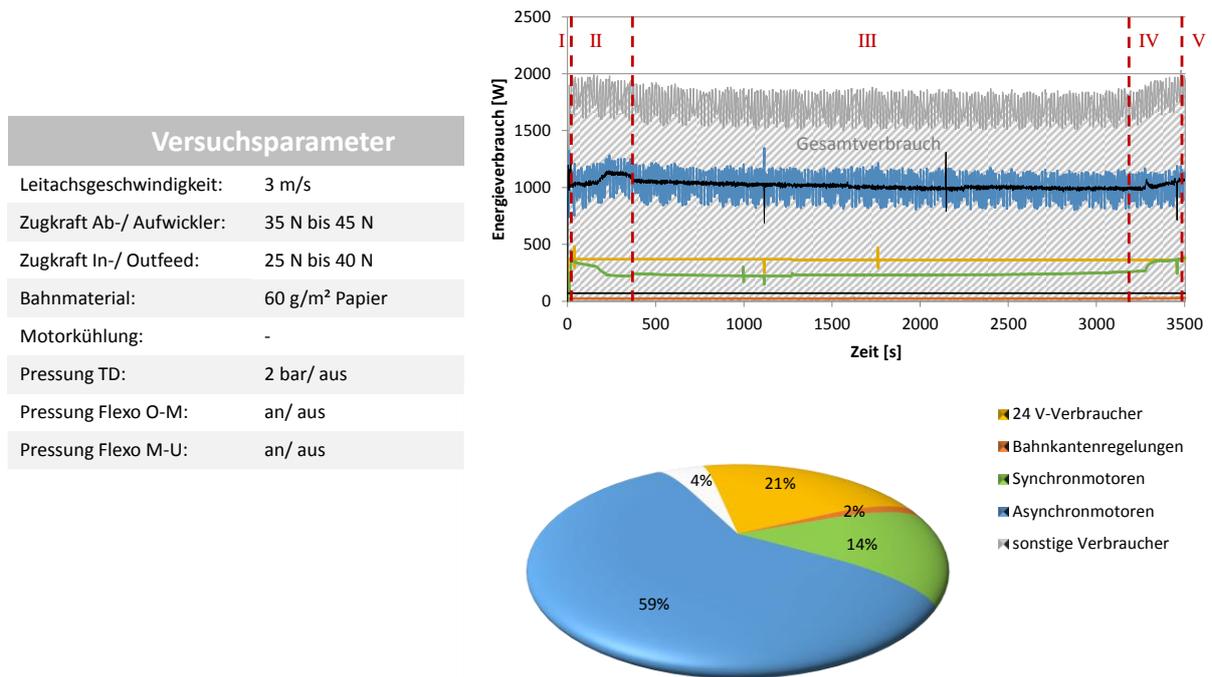


Abbildung 19:Leistungsverläufe typischer Verbrauchergruppen und Zusammensetzung der Gesamt-Wirkleistung beim Konstant-Geschwindigkeitsversuch V 4.4 in der LaborMAN II.

Tabelle 5: Unterteilung der Messkurve eines Konstant-Geschwindigkeitsversuchs in Phasen.

Phase	Beschreibung Effekte / Maschinenverhalten	
I	Anfahren	Lastspitze bei Beschleunigung auf $v = 3 \text{ m/s}$
II	Anfang	Zielgeschwindigkeit erreicht, Maschine im Grenzbereich der Regler
III	konstanter Betrieb	stabiler Bahnlauf
IV	Ende	Maschine im Grenzbereich der Regler
V	Abbremsen	Lastspitze bei negativer Beschleunigung auf $v = 0 \text{ m/s}$

In der Beschleunigungsphase, *Phase I*, steigt die Wirkleistung der Antriebsmotoren, in diesem Fall der Antriebsmotoren der Druckwerke (Asynchronmotoren) auf Werte von ca. 1000 Watt an. Die Leistungsaufnahme der vier Synchronmotoren für die Wickler und Zugwerke steigt auf Werte von ca. 350 Watt an und ist somit merklich geringer im Vergleich zu den Antriebsmotoren der Druckwerke. Die Dauer der Beschleunigungsphase betrug bei diesem Versuch ca. 30 Sekunden. In dieser Phase stellen die Asynchron- und Synchronmotoren zusammen mit den 24-Volt-Elementen die dominierenden Leistungs- bzw. Energieverbraucher dar.

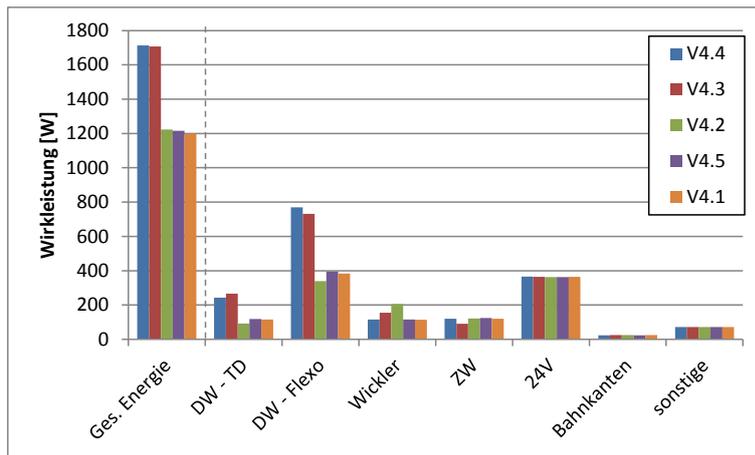
Nach dem Erreichen der Versuchsgeschwindigkeit von 3 m/s, *Phase II*, ist zu erkennen, dass die Leistung der Synchronmotoren (Wickler und Zugwerke) mit zunehmender Zeit um bis zu 130 Watt abnimmt, während die Leistung der Asynchronmotoren (Druckwerksantriebe) in etwa gleichem Maße dazu ansteigt. Die Änderungen in der Leistungsaufnahme zwischen den Synchron- und Asynchronmaschinen kann mit Regelungseingriffen der Maschine begründet werden. Nach dem finalen Einregeln beginnt der Übergang in die für die Versuchsauswertung relevante Versuchsphase, *Phase III*. Dieser Versuchsabschnitt ist die mit Abstand längste Versuchsphase, gekennzeichnet durch stabilen Bahnlauf, konstante Betriebs- und Versuchsbedingungen und liegt im Zeitintervall zwischen ca. 375 Sekunden und 3275 Sekunden. Bei genauer Betrachtung der konstanten Betriebsphase fällt erneut auf, dass der Wirkleistungsverlauf von ca. 1750 Watt bis ungefähr zur Versuchsmitte parabelförmig um ca. 50 Watt abnimmt und anschließend um den gleichem Betrag wieder parabelförmig zunimmt.

Die Leistungsanteile typischer Verbrauchergruppen an der Gesamtleistung sind im Kreisdiagramm, Abbildung 19, dargestellt. Die für den Druckwerksantrieb zuständigen Asynchronmotoren weisen mit einer Leistung von ca. 1015 Watt bzw. knapp 60 % den größten Anteil an der Gesamtleistung auf. Die Leistungsaufnahme der Synchronmaschinen von Zugwerken und Wicklern liegt bei ca. 235 Watt. Dies entspricht einem Gesamtleistungsanteil von ca. 15 %. Zum Betrieb der 24-Volt-Verbraucher müssen ca. 21 % der Gesamtleistung oder ca. 360 Watt aufgebracht werden. Auf die Bahnkantenregelung entfällt ca. 2 Prozent der Gesamtleistung. Die übrigen 4 Prozent, als „sonstige Verbraucher“ aufgeführt, entsprechen in dieser Konfiguration den übrigen Kleinverbrauchern wie z. B. Displays, Kontrollleuchten sowie dem messtechnisch erfassten Leistungsverlust zwischen Primär- und Sekundärseite der 24-Volt-Netzteile.

Dem auswertungsrelevanten Versuchsteil folgt *Phase IV*, in welchem die Druckmaschine erneut in den Grenzbereich der Regler zu kommen scheint, gekennzeichnet durch einen merklichen Anstieg der Gesamtleistung, welcher von den Synchron- und Asynchronmotoren verursacht wird. Der Versuch endet mit *Phase V*, dem Abbremsen der Druckmaschine.

Nachdem der typische Verlauf einer Wirkleistungskurve im Konstant-Geschwindigkeitsversuch detailliert analysiert wurde, werden nun die Einflüsse der Druckwerkseinstellungen und der Bahnspannungseinstellungen auf den Gesamtenergieverbrauch betrachtet. Für den Vergleich werden ausschließlich die messtechnisch erfassten Kenngrößen der konstanten Betriebsphase, *Phase III* betrachtet. Die Einbeziehung anderer Phasen wird – wenn angewendet – deutlich erwähnt.

Die Gegenüberstellung der gemessenen Wirkleistungen der durchgeführten Konstant-Geschwindigkeitsversuche mit variierten Betriebsmodi der Druckwerke- und Bahnspannungen in *Phase III* ist in Abbildung 20 zusammengefasst. Die Ergebnisdarstellung ist nach absteigender Gesamtleistung der Druckmaschine sortiert.



Summierte Bahnspannung über die Abschnitte L1, L2, L4 und L5:

V4.4: **120 N**, „Druck an“

V4.3: **160 N**, „Druck an“

V4.2: **160 N**, „Druck ab“

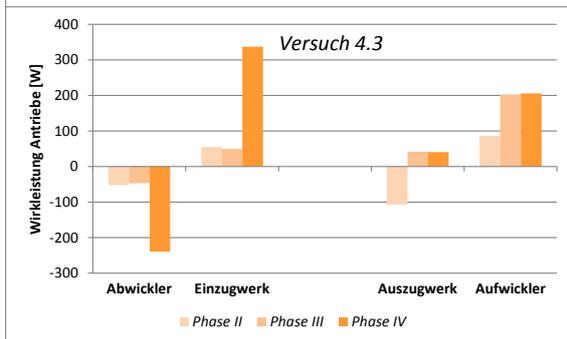
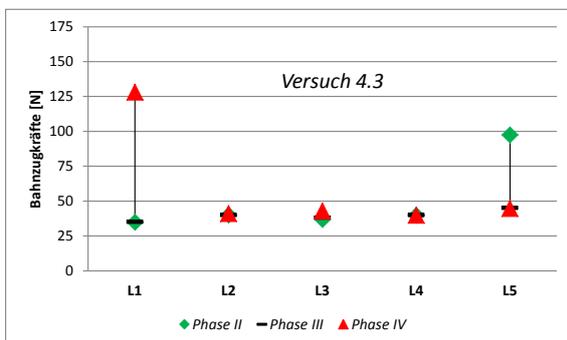
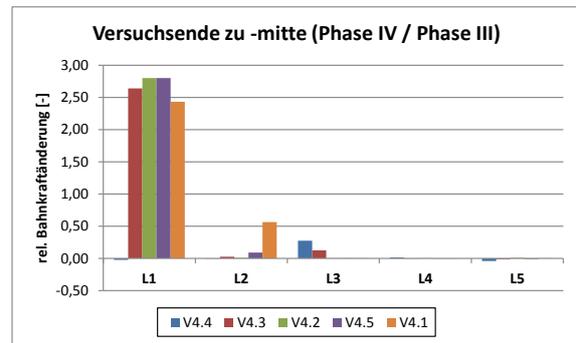
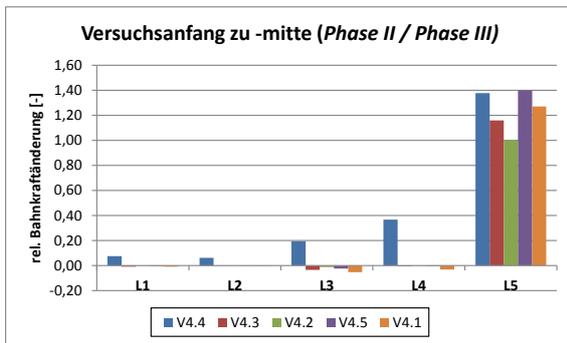
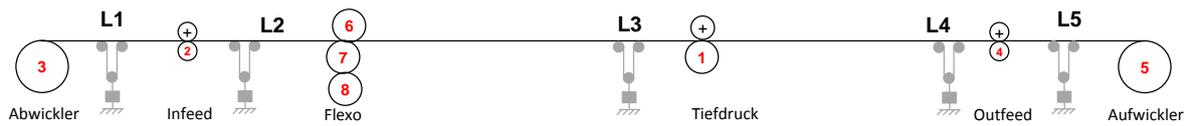
V4.5: **140 N**, „Druck ab“

V4.1: **120 N**, „Druck ab“

Abbildung 20: Leistungsbedarf der Druckmaschine und einzelner Komponentengruppen bei unterschiedlichen Bahnzugkräften und Betriebsmodi der Druckwerke (Phase III).

Erwartungsgemäß weisen die beiden Versuche mit „Druck an“ in beiden Druckwerken die größten gemessenen Gesamt-Wirkleistungswerte im Bereich von ca. 1700 Watt auf, wobei beim Versuch mit der geringeren summierten Bahnspannung eine annähernd identische bzw. lediglich um 6 Watt geringere Wirkleistung gemessen wurde. Bei den Versuchen mit „Druck ab“ in beiden Druckwerken weist der Versuch mit der größten summierten Bahnspannung den größten Wirkleistungswert auf. Eine Erhöhung der Bahnspannung führt somit zu einem leicht erhöhten Leistungsbedarf. Beim Versuch mit der größten summierten Bahnspannung und „Druck ab“ beträgt die gemessene Gesamt-Wirkleistung 1223 Watt. Der Versuch mit der geringsten summierten Bahnspannung weist eine Gesamt-Wirkleistung von 1198 Watt auf. Die Variation der Bahnspannungen in dem hier untersuchten Bereich führt zu Unterschieden in der Gesamtleistungsaufnahme von bis zu 25 Watt. Der Einfluss der Betriebsmodi „Druck ab“ / „Druck an“ auf den Leistungsbedarf der *LaborMAN II* ist hingegen deutlich größer. Ein Vergleich der Wirkleistungswerte bei identischen Bahnspannungen ergibt, dass die Leistungsaufnahme bei „Druck an“ um durchschnittlich 500 Watt, oder knapp 40 % ansteigt. Die Veränderungen in der Leistungsaufnahme der Einzelkomponenten sind sehr gut ersichtlich.

Ein weiterer interessanter Aspekt ist der Vergleich der Bahnspannungsänderungen von Versuchsbeginn zur konstanten Betriebsphase in Versuchsmittle, obere Diagrammreihe in Abbildung 21. Zum besseren Verständnis werden zusätzlich die Bahnspannungsmesspositionen in der Labordruckmaschine grafisch verdeutlicht. Das untere Diagramm von Abbildung 21 zeigt sowohl die gemittelte Wirkleistung der Wickler als auch die gemessenen Bahnspannungswerte in Versuchsmittle, zu Versuchsbeginn, als auch zu Versuchsende für Versuch 4.3. Das ist der Versuch mit der größten summierten Bahnspannung über die Bereiche L1, L2, L4 und L5.



Summierte Bahnzugkräfte über die Abschnitte L1, L2, L4 und L5:

V4.4: **120 N**, „Druck an“

V4.3: **160 N**, „Druck an“

V4.2: **160 N**, „Druck ab“

V4.5: **140N**, „Druck ab“

V4.1: **120 N**, „Druck ab“

Abbildung 21: Positionen der Bahnspannungsmessung in der LaborMAN II und Einfluss der Bahnzugkraftänderung. Vergleich zwischen Versuchsanfang bzw. -ende mit Versuchsmittle(Phase III).

Aus dem Vergleichsdiagramm Versuchsanfang zu Versuchsmittle geht hervor, dass - unabhängig von den eingestellten Bahnspannungen und unabhängig von den Betriebsmodi der Druckwerke („Druck an“ / „Druck ab“) - die größten Änderungen der Bahnspannungen in den Bereichen der Wickler (L1 und L5) auftreten. Bei allen Versuchen sind die Wickelspannungen bei L5 zwischen Auszugwerk und Aufwickler zu Versuchsbeginn in grober Näherung doppelt so groß im Vergleich zur Versuchsmittle. Das bedeutet, dass der Antriebsmotor den Aufwickler in dieser Phase verstärkt beschleunigt. Aus dem Vergleich zwischen Versuchsende und Versuchsmittle ist ersichtlich, dass die Maschinenregelung den Motor des Abwicklers verstärkt verzögert, wodurch die Bahnzugspannung an der Messstelle L1 zwischen Abwick-

ler und Einzugwerk entsprechend erhöht wird. Bei allen Versuchen sind die Bahnzugkräfte am Versuchsende in etwa 2,5-fach größer als in der Versuchsmitte.

Eine Ausnahme bildet hier der Versuch 4.4, bei welchem die Zugkraft in etwa gleich groß ist wie in *Phase III*.

Die eingestellten Regelgrößen für L5 (Aufwickler) betragen 45 Newton für die Versuche 4.3 und 4.2, bei den übrigen drei Versuchen wurden jeweils 35 N eingestellt. Weiterführende Aussagen hinsichtlich Bahnzugkraftänderung und Leistungsbedarf sind aus den Ergebnissen nicht direkt ableitbar. Die hohen Änderungen der Bahnspannung bzw. Abweichungen vom Sollwert deuten auf ein schlechtes Regelverhalten der Maschine bei zu geringen Wickeldurchmessern beider Wickler hin.

Für den Versuch 4.3 sind die berechneten Bahnzugkraftwerte in Form der Minimal-, Mittel- und Maximalwerte für die *Phasen II, III* und *IV* (Versuchsanfang, Versuchsmitte und Versuchsende) dargestellt. Hieraus sind die hohen Änderungen der Bahnzugkraftwerte des Abwicklers am Versuchsende sowie die Zugkraftänderungen des Aufwicklers am Versuchsanfang nochmals sehr gut zu erkennen. Die übrigen Veränderungen sind hingegen sehr gering. Die Leistungsanalyse der umliegenden Antriebsaggregate zeigt, dass der Abwickler über den gesamten Versuchsbereich generatorisch betrieben wird, um die Bahnspannung im an der Messstelle L1 aufrecht zu erhalten. Der hohe generatorische Leistungsanteil des Abwicklers und die deutliche Mehrleistung des Antriebs des Einzugwerks gegen Versuchsende stehen in sehr guter Übereinstimmung zum starken Anstieg der Zugkräfte zwischen beiden Aggregaten bei L1 in *Phase IV*. Ein ähnliches Verhalten kann ebenfalls zwischen Auszugwerk und Aufwickler zu Versuchsbeginn beobachtet werden. Das Auszugwerk in *Phase II* muss, um die Bahnspannung in L4 aufrecht zu erhalten, stark bremsen. Dementsprechend erhöht sich die Bahnzugkraft in L5, welche der Wickler nicht ausgleichen kann. Der Energieverbrauch des Aufwicklers bleibt in den *Phasen III* und *IV* hingegen unverändert. Der Bahnabschnitt L3 wird durch die Maschinensteuerung zwischen den Druckwerken nicht geregelt.

Bei der Analyse der Versuchsergebnisse der Grundversuche, Abbildung 10, und bei den Konstant-Geschwindigkeitsversuchen, Abbildung 19, wurde erkannt, dass die Leistungscharakteristika in der mittleren Betriebsphase (*Phase III*) als auch unter Einbeziehung der vorausgehenden *Phase II* und nachfolgenden *Phase IV* einen parabelförmigen Verlauf aufwiesen. Dort wurde ebenfalls beobachtet, dass die gemessenen Wirkleistungen in Versuchsmitte bzw. bei ungefähr halber Versuchszeit am geringsten waren. Dieser Effekt soll nun näher betrachtet werden.

Während der gesamten Versuchszeit wird der Durchmesser der Papierwickel am Ab- und Aufwickler gemessen. Bei den Konstant-Geschwindigkeitsversuchen wurde jeweils ein kompletter Papierwickel vom Ab- auf den Aufwickler gespult. Zu Versuchsbeginn ist das gesamte Material auf dem Abwickler, der Aufwickler ist (fast) leer. Bei gegebener Maschinengeschwindigkeit, gegebener Dichte des Papiers und den Durchmessern der Papierwickel am Ab- und Aufwickler kann zu jedem Zeitpunkt die Papiermasse auf beiden Wicklern berechnet werden. Die jeweiligen Winkelgeschwindigkeiten können aus den aktuellen Durchmessern

der Wickler berechnet werden. Das rechte obere Diagramm in Abbildung 22 zeigt die Entwicklung der Wickeldurchmesser über der Zeit.

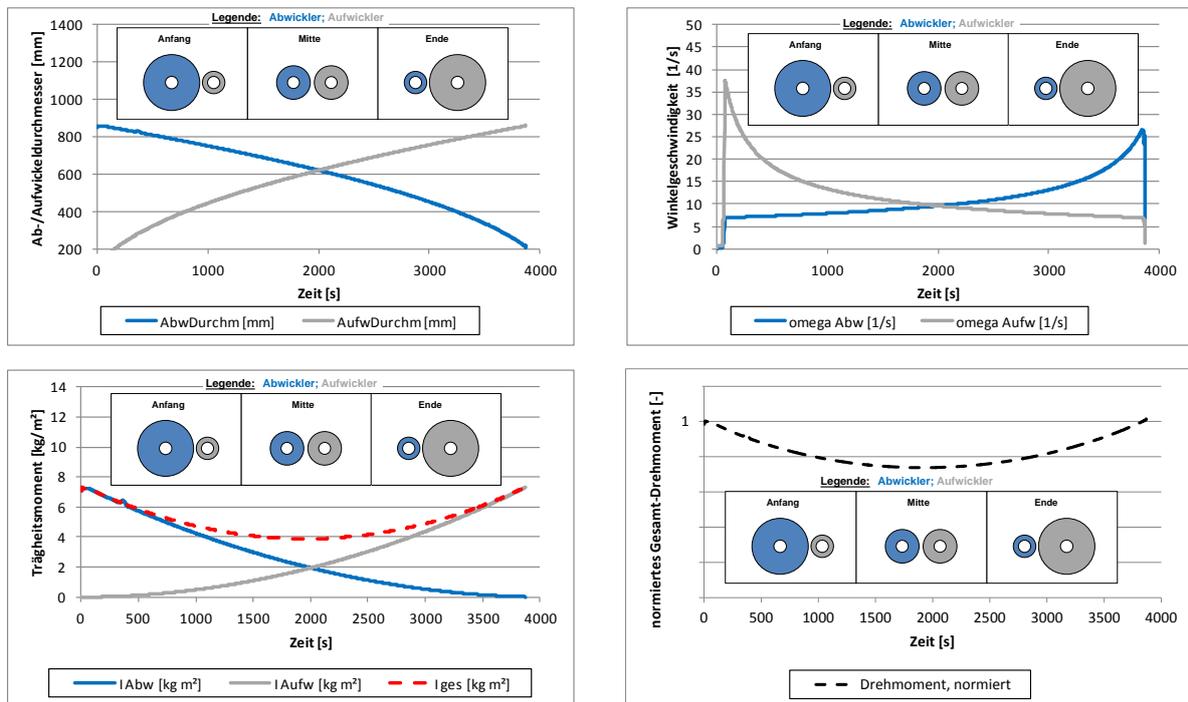


Abbildung 22: Parabelförmig ausgeprägter Energieverlauf im Zeitbereich der Versuche und die technisch-physikalische Erklärung mit Trägheitseffekten im Bereich Ab- und Aufwickler.

Für das Trägheitsmoment eines Hohlzylinders gilt:

$$I = \frac{m}{2}(r_1^2 + r_2^2)$$

mit

I	Trägheitsmoment
m	Masse des Papiers
r_1	Innendurchmesser
r_2	Außendurchmesser

Die Trägheitsmomente von Ab- und Aufwickler über der Zeit als auch die Summe der Trägheitsmomente sind in Abbildung 22, rechtes unteres Bild, dargestellt. Das Trägheitsmoment des Abwicklers weist einen parabol förmig abnehmenden Verlauf auf, der Trägheitsmomentenverlauf des Aufwicklers steigt hingegen parabol förmig an. Das Gesamtträgheitsmoment ist für zwei gleich große Wickel am geringsten. Der Verlauf des Gesamtträgheitsmoments ist demzufolge ebenfalls parabol förmig und entspricht von der Form her dem messtechnisch erfassten Energieverlauf.

Mit der Annahme, dass durch die Maschinenregelung eine Bahnlaufgeschwindigkeitsdifferenz in einem Zeitintervall Δt zu verändern ist und dem Grundgesetz der Dynamik der Drehbewegung lässt sich ein erforderliches Drehmoment mittels

$$T = I \cdot \dot{\omega}$$

mit	T	Drehmoment
	I	Trägheitsmoment
	$\frac{d\omega}{dt}$	Ableitung der Winkelgeschwindigkeit

berechnen. Die Kurvenverläufe bleiben dadurch unverändert. Das Drehmoment entspricht einer physikalischen Energie / Arbeit. Der Gesamtdrehmomentverlauf in normierter Form ist in der rechten unteren Grafik von Abbildung 22 dargestellt. Wird das zur Regelung aufzuwendende Drehmoment in einem bestimmten Zeitintervall durchgeführt, wird hierzu eine mechanische Leistung (elektrische Leistung) benötigt, welche man als „Regelungsleistung“ für die Wickler bezeichnen könnte.

Zurückgeführt auf die gemessenen Ergebnisse kann der parabelförmige Gesamt-Wirkleistungsverlauf bei konstantem Betrieb mit den sich ändernden Wickelverhältnissen und der dazu zur Regelung aufzuwendenden Mehrleistung begründet werden.

Bei den bisher beschriebenen experimentellen Versuchen wurde der Betriebspunkt bei 3 m/s und beide Druckwerke mit „*Druck an*“ sowohl beim Grundversuch während des Durchfahrens des Geschwindigkeitsprofils (Abschnitt 2.2, Abbildung 11) als auch während des zuvor beschriebenen Konstant-Geschwindigkeits-Versuchs 4.3 (Abbildung 19) durchfahren und ausgewertet. Die Maschineneinstellungen waren in beiden Versuchskonfigurationen gleich. Im Grundversuch mit durchfahrenem Geschwindigkeitsprofil wurde bei 3 m/s eine Wirkleistung von 2190 Watt gemessen. Beim Konstant-Geschwindigkeitsversuch ergab sich für *Phase III* ein Mittelwert von ca. 1715 Watt, was einem Leistungsunterschied von 475 Watt entspricht. Nach ausgiebigem Vergleich der Versuchsdaten konnte die Ursache für die Messunterschiede in der Verstellung der Zylinderachsen des Flexodruckwerks gefunden werden. Wie bereits beschrieben werden der Gummi- und der Gegendruckzylinder über eine pneumatische Exzenterbewegung angestellt. Dabei ist der Druck der Anstellung konstant auf 6 bar eingestellt. Die Pressungsverhältnisse im Druckspalt werden über die Exzenterhublänge respektive über die Zylinderabstände definiert. Ein Eingriff in das System, beispielsweise durch Wechsel des Gummisleeves oder Änderung der Substratdicke, bedingt somit auch eine erneute Einstellung der Zylinderabstände. Diese Verstellung ist sehr sensitiv hinsichtlich des resultierenden Energieverbrauchs des Flexodruckwerks und ist nicht durch numerische Einstellungen reproduzierbar.

Detaillierte Versuche zur Überprüfung der Einstellungen am Flexodruckwerk und deren Einfluss auf den Leistungs- und Energieverbrauch sind für die zweite Teilprojektphase geplant.

2.7 ANALYSE ZUR ANZAHL UND UMSCHLINGUNG VON LEITWALZEN

Zur Untersuchung des Einflusses von Leitwalzen auf den Leistungsbedarf wurden an der *LaborMAN II* insgesamt 13 zusätzliche Leitwalzen in den Bahnabschnitt zwischen Flexo- und Tiefdruckwerk eingebaut. Die experimentell untersuchten Bahnlauf-Konfigurationen sind in Abbildung 23 übersichtlich zusammengestellt.

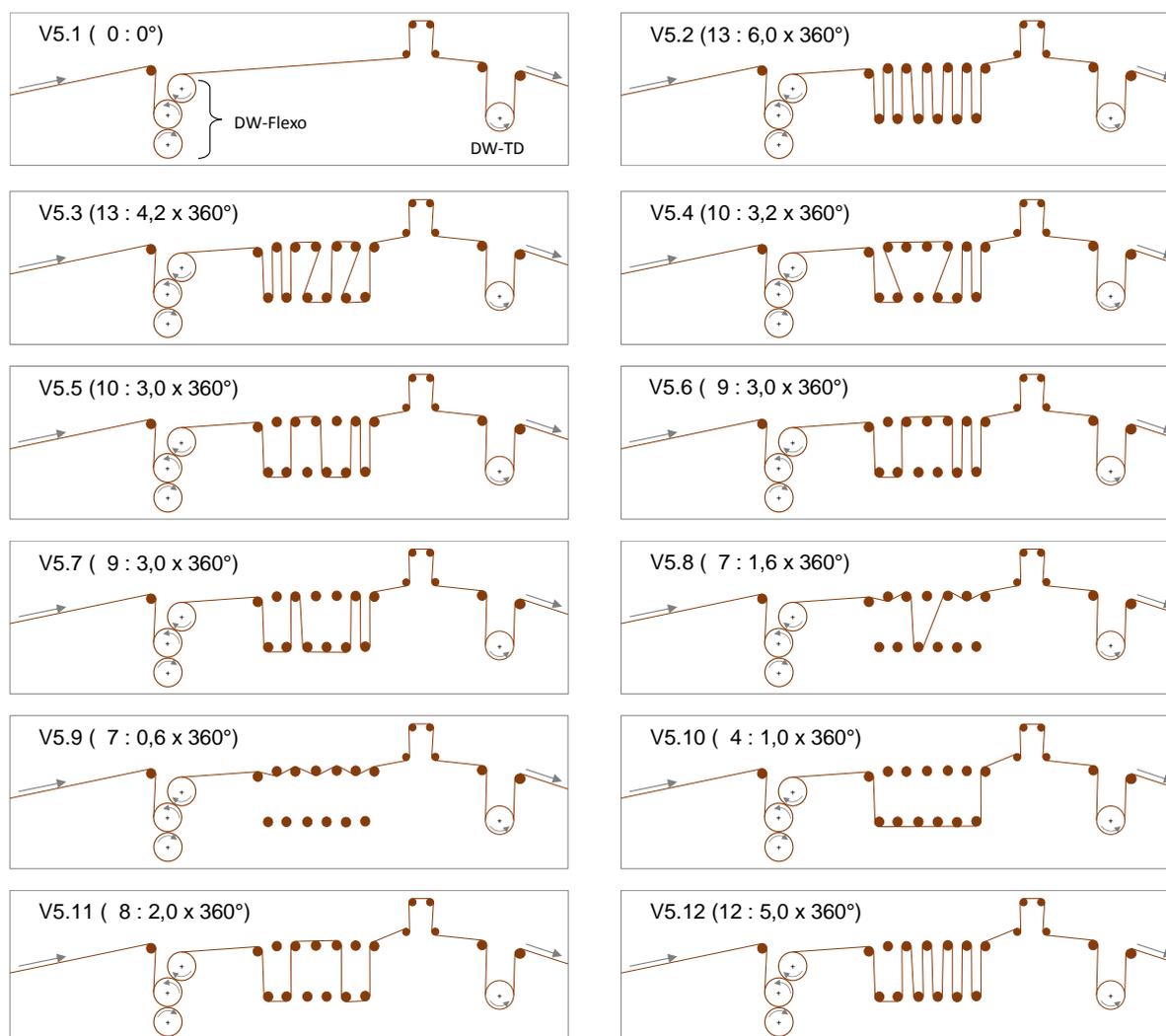


Abbildung 23: Untersuchte Variationen im Bahnlauf zwischen den Druckwerken zur Analyse des Einflusses der Anzahl zusätzlich angetriebener Leitwalzen und des Umschlingungswinkels auf den Energieverbrauch der *LaborMAN II*.

In insgesamt 12 Einzelversuchen mit dem standardmäßig angewendeten stufenartigen Geschwindigkeitsprofil wurde der Bahnlauf der integrierten Leitwalzen und der Umschlingungswinkel von minimaler Anzahl Leitwalzen : Umschlingung (0 : 0°), V5.1, bis zu maximaler Anzahl Leitwalzen : Umschlingung (13 : 6,0 x 360°), V5.2, gemessen. Beide Druckwerke wurden im Modus „*Druck an*“ betrieben. Da die Auswirkungen der Änderungen im

Bahnlauf auf den Energieverbrauch der Antriebsmotoren eher gering zu erwarten sind, wurde die Pressung im Flexodruckwerk auf ein Minimum reduziert und somit starkes Rauschen in den Messwerten unterdrückt. Um dennoch eine schlupffreie Bahnführung im Druckwerk zu gewährleisten, wurde eine druckuntypische, S-förmige Umschlingung gewählt. Die Zugkräfte an den Wicklern wurden mit jeweils 35 N eingestellt, an den Zugwerken wurden je 25 N eingestellt. Die resultierende Zugkraft zwischen den Druckwerken, Position L3 in Abbildung 18, betrug ca. 25 Newton.

Die gemessene Leistungsaufnahme in Form der Antriebsleistungen der Motoren beider Druckwerke sowie der Verbrauchergruppen Wickler und Zugwerke sind in Abbildung 24 für alle Versuchsvariationen bei Leitachsgeschwindigkeiten von 3,0 m/s dargestellt. Die Versuche sind derart sortiert, dass die Anzahl der zusätzlich zu umschlingenden Leitwalzen von links nach rechts ansteigt.

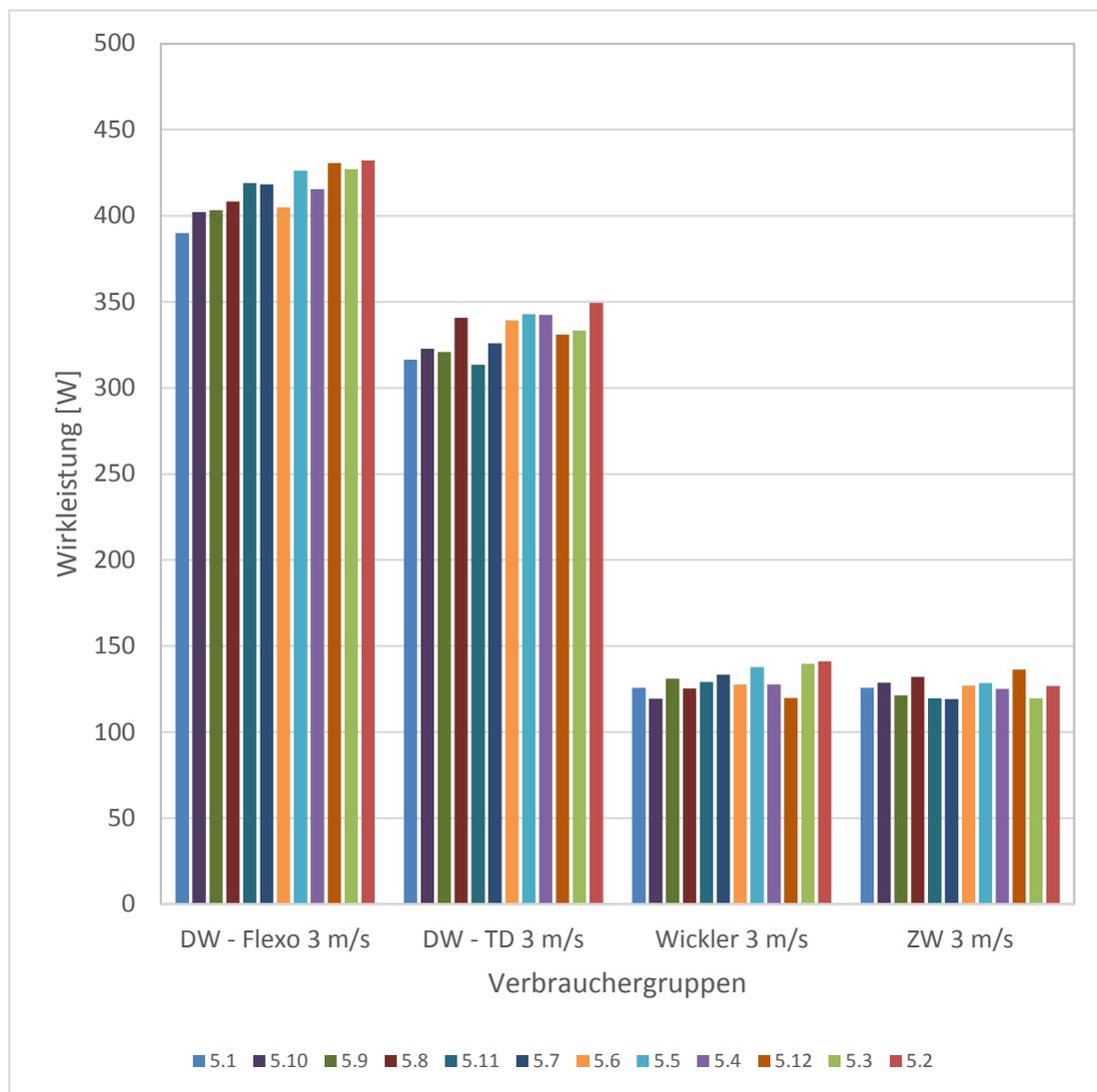


Abbildung 24: Leistungsbedarf der Verbrauchergruppen Druckwerke bei „Druck an“, Wickler und Zugwerke der LaborMAN II bei einer Bahngeschwindigkeit von 3,0 m/s für alle untersuchten Bahnlaufvariationen.

Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass die Wirkleistungswerte, genauer die ausgelesenen Leistungswerte der Antriebsmotoren, der Druckwerke zunehmen, je mehr zusätzliche Leitwalzen im Bahnlauf umschlungen werden. Die Papiergeschwindigkeit und die Oberflächen- geschwindigkeit der Papierleitwalze bei Umschlingung werden als identisch betrachtet, d. h. der Papiertransport erfolgt schlupflos. Die zusätzliche Antriebsleistung muss zur Überwin- dung der Reibung in den Wälzlagern der Papierleitwalzen aufgewendet werden. Demzufolge steigt die zusätzlich erforderliche Antriebsleistung mit jeder zu umschlingenden Papierleit- walze an. Diese Tendenz ist im Flexo-Druckwerk stärker ausgeprägt erkennbar als im Tief- druck-Druckwerk. Die Antriebsleistungen der Wickler und Zugwerke scheinen hierbei eher unabhängig von der Anzahl der zusätzlich zu umschlingenden Leitwalzen bzw. dem Gesam- tumschlingungswinkel zu sein. Die ausgelesenen Leistungswerte der Antriebsmotoren des Flexodruckwerks liegen bei Bahngeschwindigkeiten von 3 m/s zwischen 390 Watt und 430 Watt, für das Tiefdruckwerk werden Antriebsleistungen von 310 Watt bis 350 Watt aus- gegeben.

Aus der Darstellung der Antriebsleistungswerte in Abhängigkeit der Anzahl zusätzlich um- schlungener Leitwalzen bzw. des entsprechenden Umschlingungswinkels kann der Einfluss beider Größen auf den Leistungsbedarf der Druckwerksantriebe detailliert analysiert werden. Abbildung 25 zeigt die Antriebsleistung der Druckwerksmotoren für Bahngeschwindigkeiten von 1,0 m/s und 3,0 m/s.

Aus der Darstellung der Antriebsleistungen in Abhängigkeit der Anzahl im Bahnlauf inte- grierten Leitwalzen lassen sich für beide Druckwerke und Geschwindigkeiten in sehr guter Näherung lineare Abhängigkeiten erkennen. Es wird angenommen, dass alle Leitwalzen in etwa identische geschwindigkeitsabhängige Reibungswerte aufweisen. Jede zusätzlich im Bahnlauf integrierte Leitwalze ist also gleichbedeutend mit einem zahlen- und betragsmäßig gleichen Anstieg der zusätzlich aufzubringenden Antriebsleistung. Für das Tiefdruckwerk kann aus den gemessenen Antriebsleistungen bei 1 m/s eine Ausgleichsgerade berechnet werden, welche einer Grundleistung von 210 Watt (keine umschlungene Walze) entspricht. Für jede zusätzlich zu umschlingende Leitwalze sind demzufolge ca. 1,4 Watt aufzubringen. Bei 3 m/s berechnet sich eine Grundleistung von 320 Watt und eine durchschnittliche Mehr- leistung von ca. 1,9 Watt pro zusätzlich umschlungener Leitwalze. Für das Flexo-Druckwerk ergibt sich bei einer Leitachsgeschwindigkeit von 1 m/s eine Grundleistung von ca. 290 Watt plus einem zusätzlichen Leistungsbedarf von 1,2 Watt pro Leitwalze. Bei 3,0 m/s werden 390 Watt sowie eine Mehrleistung von 3,2 Watt pro Leitwalze berechnet.

Der Einfluss der Anzahl von Papierleitwalzen im Bahnlauf ergibt sich aus der Summierung der Mehrleistungen beider Druckwerke. Bei 3,0 m/s Leitachsgeschwindigkeit berechnet sich eine zusätzliche Mehrleistung von 5,1 Watt pro Leitwalze. Bei 1,0 m/s müssen hingegen zu- sätzlich pro Leitwalze lediglich 2,6 Watt aufgewendet werden.

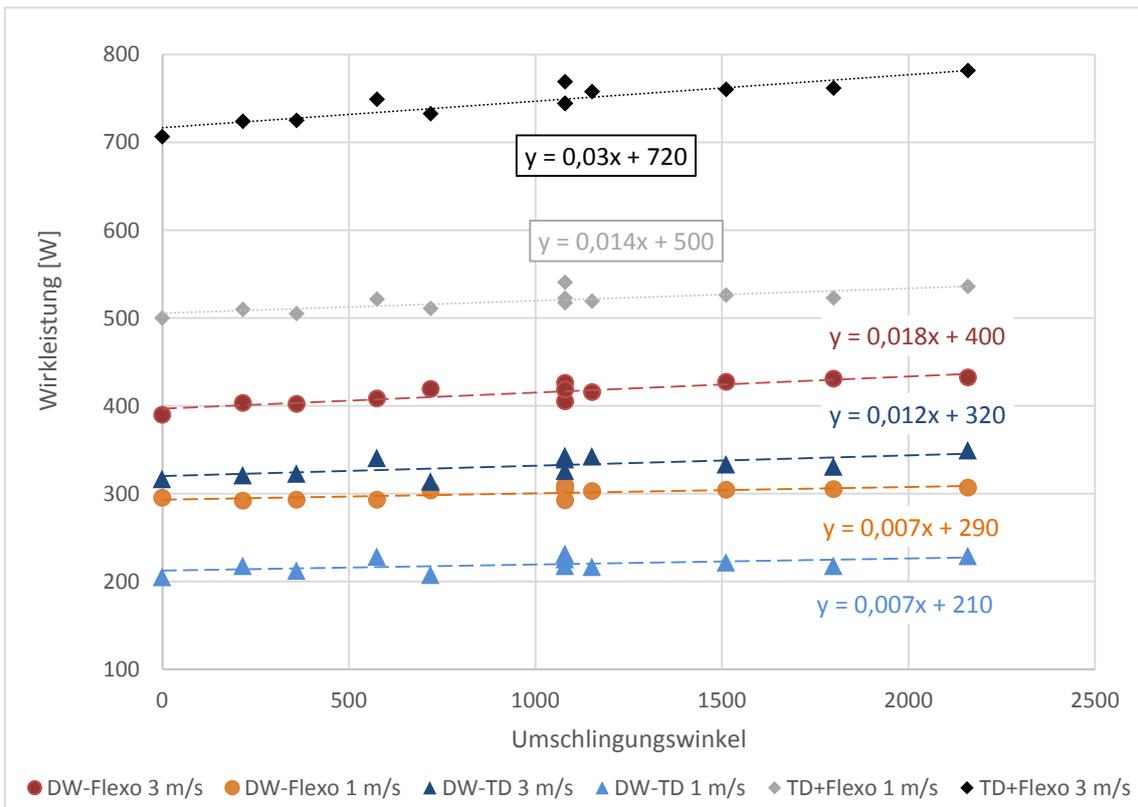
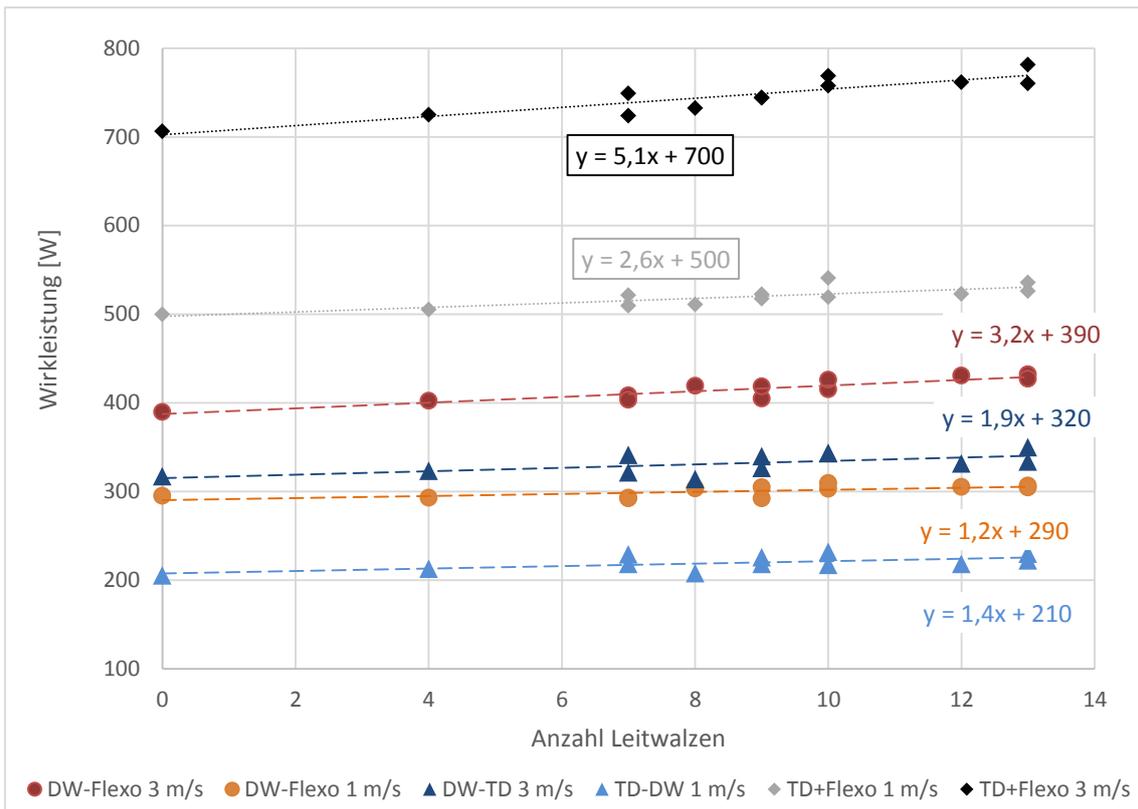


Abbildung 25: Leistungsbedarf der Druckwerke in Abhängigkeit der Anzahl umschlungener Walzen und in Abhängigkeit des Gesamt-Umschlingungswinkels der LaborMAN II.

Die Auftragung der Versuchsergebnisse über dem Umschlingungswinkel zeigt ebenfalls eine lineare Abhängigkeit zur Leistungsaufnahme. Physikalisch betrachtet ist die Darstellung über den Gesamt-Umschlingungswinkel jedoch weniger aussagekräftig. Unter der Voraussetzung eines schlupffreien Bahntransports gilt, dass für jede in den Bahnlauf integrierte Leitwalze eine bestimmte Antriebsleistung aufgebracht werden muss. Beispielsweise lassen sich identische Gesamtumschlingungswinkel mit einer unterschiedlichen Anzahl Papierleitwalzen realisieren. Aufgrund der aufzubringenden einzelnen Reibleistungen pro Leitwalze resultieren unterschiedliche Gesamtantriebsleistungen.

2.8 ANALYSE DER HART-WEICH-ZYLINDERPAARUNG MIT EINZELANTRIEBSTECHNIK

Im Offsetdruck wird die Pressung im Druckspalt über den Überstand des Gummituchs definiert. Um diese Eigenschaft im Labor abbilden zu können, wurde das erste Druckwerk (Flexodruckwerk) der *LaborMAN II* auf Offset umgerüstet. Das Flexodruckwerk ist aus drei direktangetriebenen Achsen aufgebaut, Abbildung 27. Im Laufe der Betriebsdauer eines Gummituchs kommt es durch Setzen des Gummis zu geringen Änderungen der Pressung im Druckspalt bzw. zu minimal unterschiedlichen Abrolllängen zwischen Gummituch- und Plattenzylinder. Diese unterschiedlichen Abrolllängen wurden im Labor mit geringfügig unterschiedlich dicken Gummisleeves nachgestellt. Die Gummioberfläche ist unstrukturiert und simuliert das Abrollverhalten eines Offset Gummituchs auf den Platten- bzw. harten Gegen-druckzylinder.

In der Maschinensteuerung sind alle Achsen mit demselben Getriebeverhältnis zur virtuellen Leitachse hinterlegt, da alle Zylinder im Druckprozess denselben Durchmesser von 220 mm haben sollten. Vor Versuchsbeginn wurden alle Zylinder in der Koordinatenmessmaschine *ZEISS Micura* vermessen. Dieses System ermöglicht Messgenauigkeiten von unter einem Mikrometer bei einer minimalen Antastkraft von 50 mN. Die Messung entlang des Zylinderumfangs wurde an verschiedenen Positionen über der Zylinderbreite durchgeführt. Abbildung 26 zeigt beispielhaft einen der vermessenen Gummizylinder.

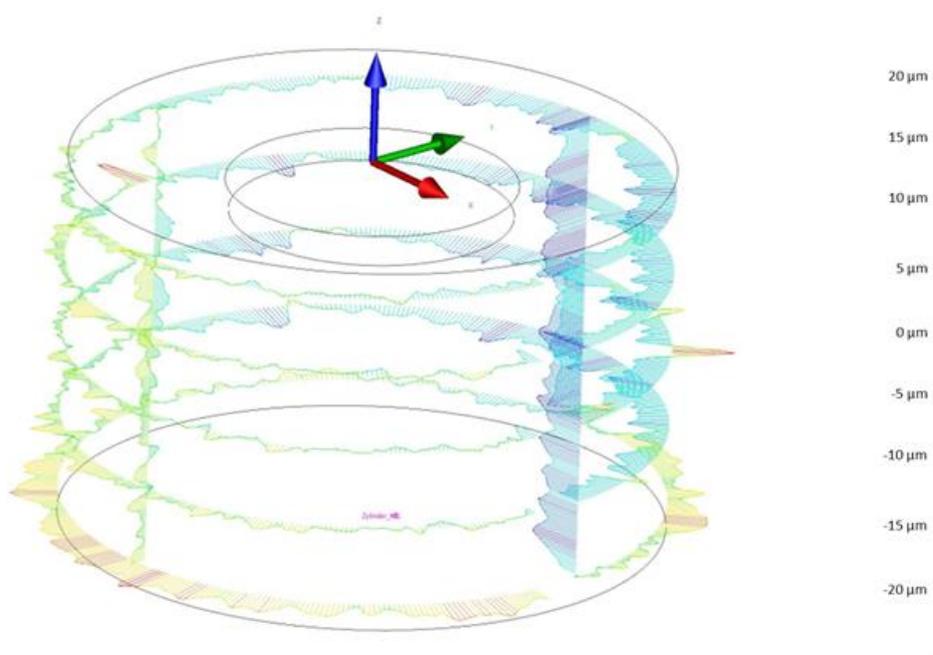


Abbildung 26: Ermittlung der Zylinderdurchmesser durch Vermessen der Mantellinie mit einem ZEISS Micura Koordinatenmesssystem.

Die Vermessung der Zylinder inkl. Sleeve ergab folgende reale Durchmesser:

Tabelle 6: Messtechnisch ermittelte Zylinderdurchmesser der LaborMAN II.

Zylinder	gemessener Durchmesser	Abweichung vom Sollwert	Material
Gummizylinder 1	219,936 mm	- 64 µm	weich: Material A (weicher)
Gummizylinder 2	220,050 mm	+ 50 µm	weich: Material A (weicher)
Gummizylinder 3	220,034 mm	+ 34 µm	weich: Material A (weicher)
Gummizylinder 4	220,063 mm	+ 63 µm	weich: Material B (härter)
Gegendruckzylinder	220,166 mm	+ 166 µm	hart
Aniloxzylinder	220,061 mm	+ 61 µm	hart

Aus dieser Zusammenstellung ist ersichtlich, dass keiner der vorhandenen Zylinder exakt den Sollwertumfang aufweist. Die Abweichungen liegen im Mikrometerbereich und sind bislang unbemerkt geblieben, da sie auf die Druckqualität keinen nennenswerten Einfluss haben. Abbildung 27 zeigt das für diese Versuchsreihe verwendete System aus drei direktangetriebenen Zylindern im Flexodruckwerk, wobei der obere und untere Zylinder über alle Versuche unverändert bleiben.

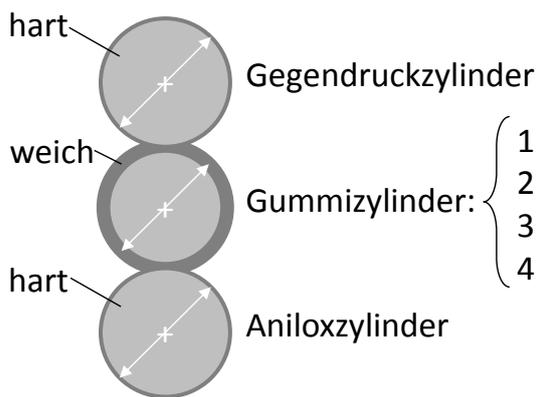


Abbildung 27: schematischer Versuchsaufbau für die Analyse einer hart-weich Zylinderpaarung mit verschiedenen großen Durchmessern des Gummizylinders.

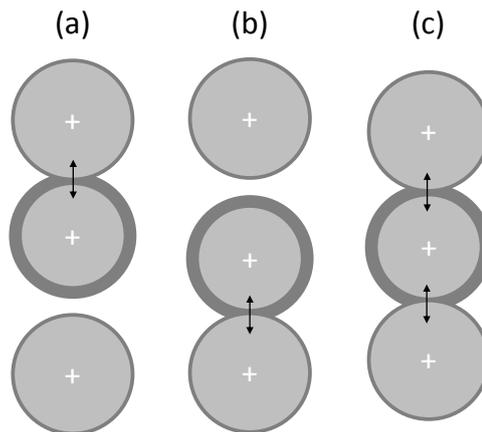


Abbildung 28: Versuchsdurchführung mit 3 Pressungszuständen: (a) Gegendruckzylinder und Gummizylinder, (b) Gummizylinder und Aniloxzylinder, (c) Gegendruckzylinder und Gummizylinder und Aniloxzylinder.

In der Versuchsdurchführung werden drei verschiedene Zylinderzustellungen/ Pressungszustände gefahren. Dabei wird der Kontakt zwischen (a) Gegendruck- und Gummizylinder, (b) Gummi- und Aniloxzylinder und (c) zwischen allen drei Zylindern hergestellt, Abbildung 28. In jeder Zylinderzustellung werden drei Geschwindigkeitsstufen durchfahren: 1 m/s, 2 m/s und 3 m/s.

Da alle drei Zylinder von der Maschinensteuerung als gleich groß angesehen werden, ist die Abweichung vom Sollwert der Durchmesser ein systematischer Fehler in der Geschwindigkeitsregelung. Ein kleinerer Zylinder hat demnach eine geringere Oberflächengeschwindigkeit zur Folge und wird vom angrenzenden größeren Zylinder beschleunigt. Da diese Beschleunigung vom System wieder ausgeregelt werden muss, ist eine energetische Mehrleistung oder zusätzlicher Energiebedarf erforderlich. In den durchgeführten Versuchen konnte bewiesen werden, dass mit zunehmender Umfangsdifferenz kontaktierender Zylinder der Leistungsbedarf steigt. Dabei weist der Gummizylinder mit zunehmender Geschwindigkeit eine ansteigende Leistungsaufnahme und der angrenzende harte Zylinder einen absinkende Leistungsaufnahme auf. Je geringer die Abweichung beider Zylinderdurchmesser ist, desto geringer ist der Einfluss der Geschwindigkeit auf den Leistungsbedarf.

In Abbildung 29 sind die ausgegebenen Motorleistungen der drei angetriebenen Zylinder bei unterschiedlichen Zustellungen dargestellt.

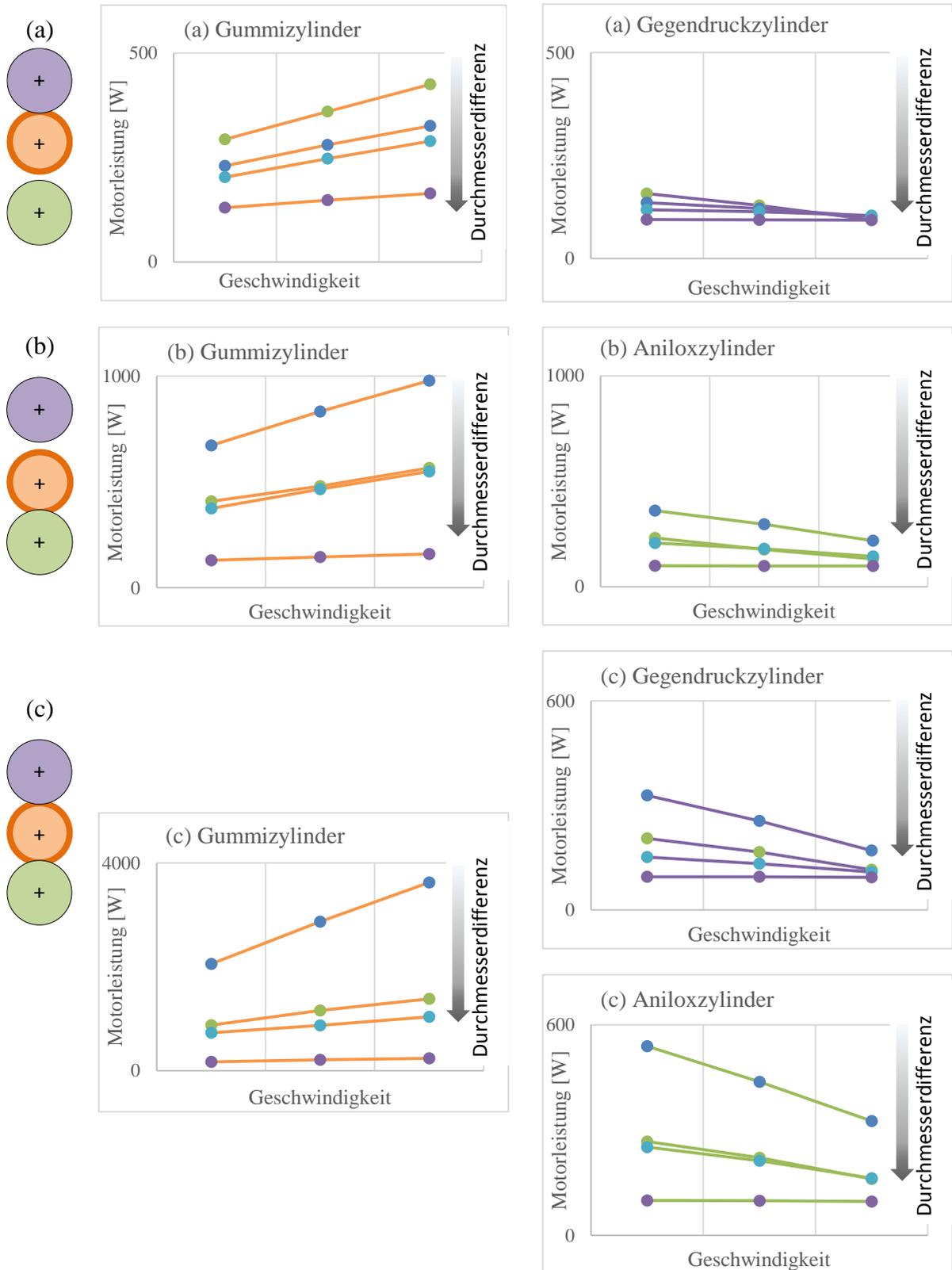


Abbildung 29: Leistungsbedarf der verschieden großen Gummizylinder bei unterschiedlichen Zylinderzustellungen, LaborMAN II.

Die Versuche zeigen eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse mit oben beschriebenem tendenziellem Verlauf der Energieverbräuche. Es ist ersichtlich, dass die beidseitige Zylinderzustellung (c) einen signifikanten Mehrverbrauch aller Antriebe bewirkt. Im besonderen Maße ist davon der mittlere weiche Gummizylinder betroffen. Beim maximalen Ausreizen des Variationsbereichs mit erhöhter Pressung zwischen den Zylindern wurden in der Maschine Spitzenbelastungen von bis zu 5 kW erreicht. Bei einer in Abbildung 29 dargestellten Kombination und beidseitiger Druckbeistellung wurde ein Anstieg der Gesamt-Wirkleistung auf knapp 4000 Watt gemessen. In Summe zeigt sich, dass der Energieverbrauch auf bis zu Faktor 10 im Vergleich zur einseitigen Zylinderzustellung ansteigt. Auf Aussagen zu prozentualen Einsparpotentialen durch exakte Zylinderumfänge wird hier bewusst verzichtet, da die vom Antrieb ausgelesenen Energieverbrauchswerte mit einem dynamischen Fehler behaftet sind.

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zeigen dennoch ein eindeutiges energetisches Optimierungspotential bei Zylinderpaarungen mit Einzelantriebstechnik. Dennoch ist anzumerken, dass die Versuche gezielt unter extremen Bedingungen durchgeführt wurden, welche so in der Realität nicht anzutreffen sind. Um den Einfluss verschiedener Abwickellängen untersuchen zu können, wurden bewusst Zylinder mit deutlichen Durchmesserunterschieden gewählt. Im realen Offsetdruck laufen die Zylinder im Druckwerk über Schmitzringe in einem festen Abstand zueinander. Die Pressung im Druckspalt wird über den Überstand des Gummituchs bestimmt. Ist der Überstand und somit die Pressung zu hoch, führt dies zu sichtbaren Fehlern im Druckbild, welche als Schieben bekannt sind, Abbildung 30.

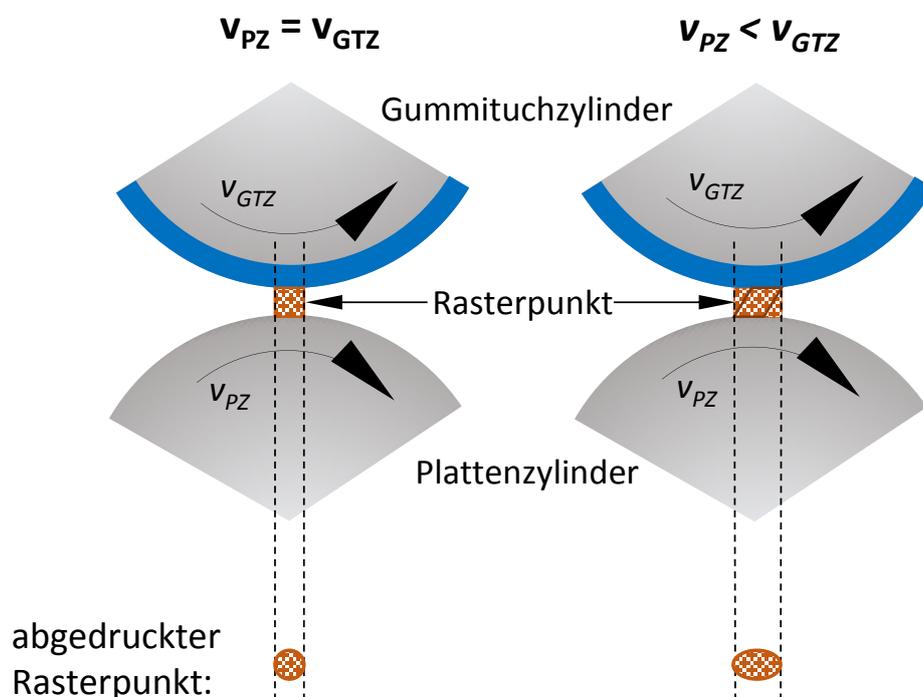


Abbildung 30: Schieben im Offsetdruck infolge eines Abwickelfehlers zwischen Gummituch und Plattenzylinder.

Im Druckprozess kommen weiche Zylinderoberflächen an verschiedenen Stellen zum Einsatz. So kann es sich beispielsweise um Drucktücher des Flexo- oder Offsetdrucks handeln sowie um gummierte Walzen der Farb- und Feuchtwerke. Belastungen durch Walzenkontakt über einen längeren Zeitraum führen zum „Setzen“ der weichen Materialien, wodurch der Durchmesser der Zylinder sinkt. Eine Verkleinerung des Durchmessers hat eine Verringerung der wirksamen Pressung im Druckspalt zur Folge und eine zu geringe Pressung wiederum resultiert in einem schlechten Ausdruck. Somit ist das Fenster, in dem die Abwickellängen im Offsetdruck schwanken können – ohne zu einer Verminderung der Druckqualität zu führen – sehr gering. Die extremen Versuchsbedingungen verdeutlichen allerdings, dass sich Zylinder verschiedener Oberflächengeschwindigkeiten hinsichtlich des Energieverbrauchs negativ beeinflussen. Diese Erkenntnis könnte in einem Condition-Monitoring-System sinnvoll eingesetzt werden. Wenn die Leistungs- bzw. Energieverbrauchswerte fortlaufend überwacht werden könnte ein Fehler in den Abwickellängen in den Leistungsdaten der Antriebe erkannt werden bevor er sich negativ auf die Druckqualität auswirken kann. Ursachen für Abweichungen vom Sollwert können dann beispielsweise ein zu dicker Unterlagebogen oder ein zu starkes Setzen des Offset- Gummizylinders sein. Mit diesen vorhandenen, stets aktuellen Informationen könnte frühzeitig gehandelt und unnötige Makulatur verhindert werden.

2.9 ZUSAMMENFASSUNG UND QUERVERGLEICH DER *LABORMAN II*-VERSUCHSERGEBNISSE

Die Messergebnisse der *LaborMAN II* wurden bisher stets in Form von augenblicklich gemessenen Wirkleistungswerten und Wirkleistungsmittelwerten dargestellt und analysiert. Werden die Zustände der Labordruckmaschine zum Zeitpunkt der Messung über einen längeren Zeitraum als konstant angenommen, so führt die Multiplikation der Leistungsmittelwerte mit der Zeit auf die Energie. Als Standardtakt hat sich die Zeiteinheit von einer Stunde etabliert. Somit wird aus der Leistung in Watt in diesem Intervall die betragsmäßig gleiche Energie bzw. der Energieverbrauch in Wattstunden (Wh) oder Kilowattstunden (kWh). Wenn Messergebnisse aus einem Abschnitt des Berichts aufgegriffen und analysiert werden, wird auch weiterhin die Maßeinheit der Leistung beibehalten. Für die Analyse der Leistungsanteile von Komponenten und Baugruppen an der Gesamtmaschinenleistung wird vorausgesetzt, dass es sich um konstante Betriebs- bzw. Prüfzustände handelt. In diesem Fall wird das Einheitensystem der Energie bevorzugt. Dies gilt im Speziellen für vergleichende Zusammenfassungen in Form Kreisdiagrammen.

Um ein umfassenden Überblick der durchgeführten Versuche und Versuchsergebnisse an der Labordruckmaschine *LaborMAN II* gewährleisten zu können, sollen zunächst alle wesentlichen Versuchsergebnisse in einem Diagramm zusammengefasst dargestellt werden, Abbildung 31.

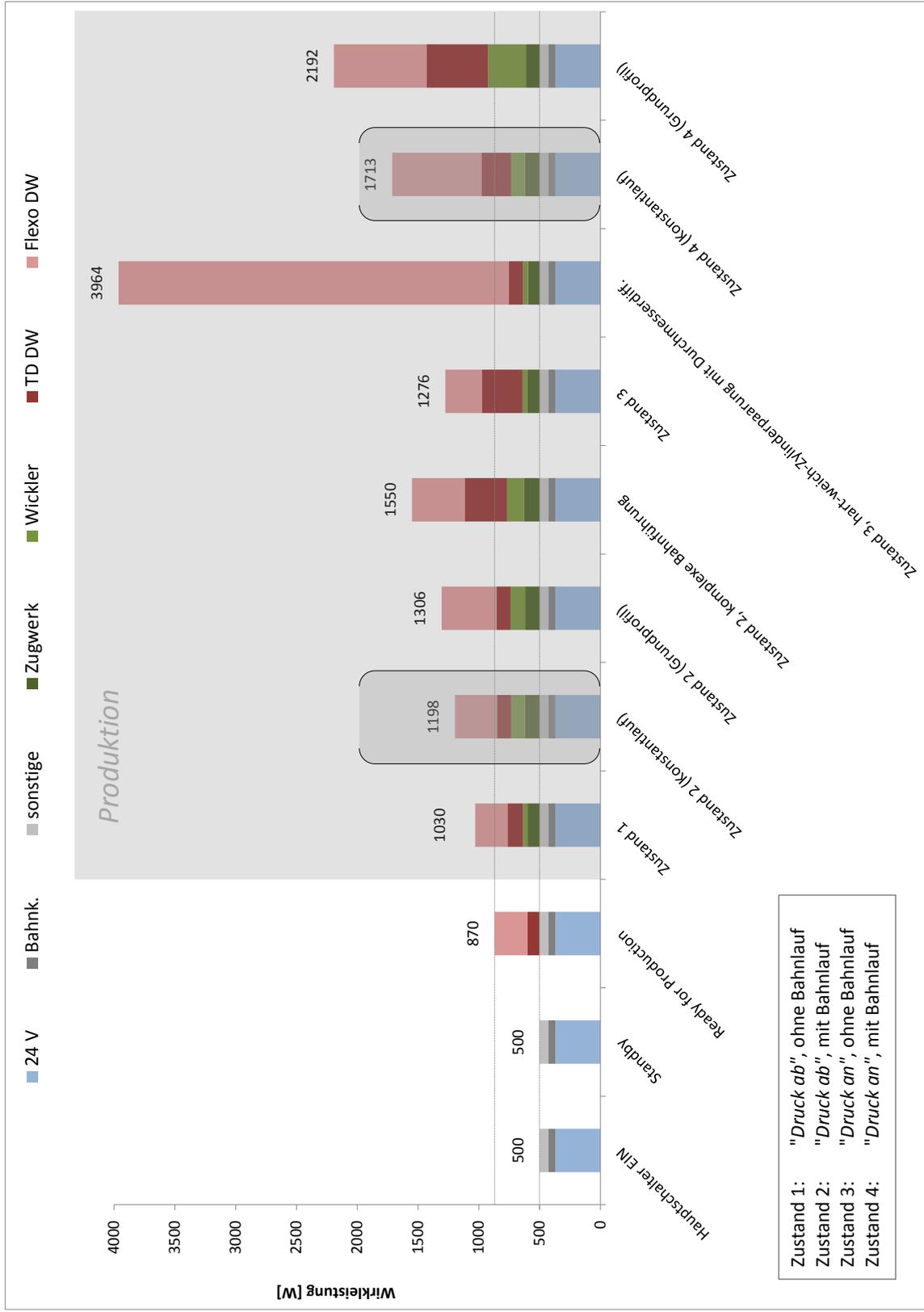


Abbildung 31: Bedeutung der einzelnen Versuchsergebnisse im Projekt SEMpress.

Die Leistungsaufnahme der *LaborMAN II* liegt bei den Maschinenzuständen *Hauptschalter EIN* als auch im *Standby* bei 500 Watt. Der größte Teil der Leistung wird durch die 24-Volt-Elemente verbraucht. Die weiteren aktiven Verbrauchergruppen sind die Bahnkantensteuerung und die sonstigen Verbraucher. Alle drei Verbrauchergruppen stellen Konstant-Verbraucher dar. Im Zustand „*Ready for Production*“ oder „*R4P*“ werden zusätzlich die Druckwerksantriebe mit Strom versorgt, wodurch die Gesamtleistung auf ca. 870 Watt ansteigt. Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse beziehen sich jeweils auf Leitachsgeschwindigkeiten von 3 m/s.

Ohne Bahntransport und bei „*Druck ab*“ steigt die Leistungsaufnahme der Maschine auf insgesamt ca. 1030 Watt an. Zusätzlich aktivierte Verbraucher gegenüber dem *R4P*-Zustand sind die beiden Wickler und Zugwerke. Durch zusätzlichen Bahntransport steigt die Gesamtleistung der *LaborMAN II* auf 1306 Watt an. Durch Änderung der Betriebsmodi der Druckwerke zu „*Druck an*“ wird für die *LaborMAN II* ohne Bahnlauf eine Wirkleistung von 1280 Watt gemessen. Zusätzlicher Papiertransport erhöht die Gesamtleistung der Maschine um ca. 910 Watt auf ca. 2190 Watt.

In eingeklammelter Form sind zusätzlich die Versuchsergebnisse aus den Konstantlauf-Versuchen der mittleren Versuchsphase (*Phase III*) dargestellt. Die abweichenden Messergebnisse resultieren, trotz identischer Maschineneinstellungen, aus den ausgegebenen Leistungsdaten der Antriebsmotoren des Flexodruckwerks. Die Einstellungen des Flexodruckwerks sind demzufolge sehr sensitiv und haben dadurch einen sehr großen Einfluss auf die Leistungsaufnahme. Weitere experimentelle Versuche hierzu sind in der zweiten Projektphase geplant.

Durch Veränderungen im Bahnlauf zwischen den Druckwerken in Form von bis zu 13 zusätzlich zu umschlingenden Papierleitwalzen wurde bei „*Druck ab*“ eine Gesamtleistung von bis zu 1550 Watt bzw. ein Leistungsanstieg von bis zu 250 Watt gemessen.

Die größten Veränderungen in der Leistungsaufnahme der *LaborMAN II* ergaben sich durch die Verwendung unterschiedlicher Zylinderpaarungen (hart/weich) im Flexodruckwerk, wobei die Zylinder zusätzlich noch minimal unterschiedliche Durchmesser aufwiesen. Durch die Verwendung glatter Zylindergeometrien für den Aniloxzylinder und den Gegendruckzylinder wurde das Flexodruckwerk quasi als Offsetdruckwerk betrieben. Bei diesen Variationen ergaben sich die größten relativen Änderungen in der Leistungsaufnahme. Bei einer in diesem Bericht nicht explizit dargestellten Kombination wurden Gesamtleistungswerte der Labordruckmaschine von über 5000 Watt gemessen. Den größten Leistungs- und somit Energieverbraucher stellten dabei die Antriebsmotoren des Flexo-Druckwerks dar.

Wichtige Vergleiche von Einflussparametern auf die Leistungsaufnahme - und somit unter konstanten Betriebsbedingungen auf den Energieverbrauch - sollen nun aufgezeigt und analysiert werden. Als erstes wird der Einfluss der Maschinengeschwindigkeit auf die Energieverteilung in der *LaborMAN II* bei „*Druck an*“ sowie „*Druck ab*“ in beiden Druckwerken betrachtet, Abbildung 32.

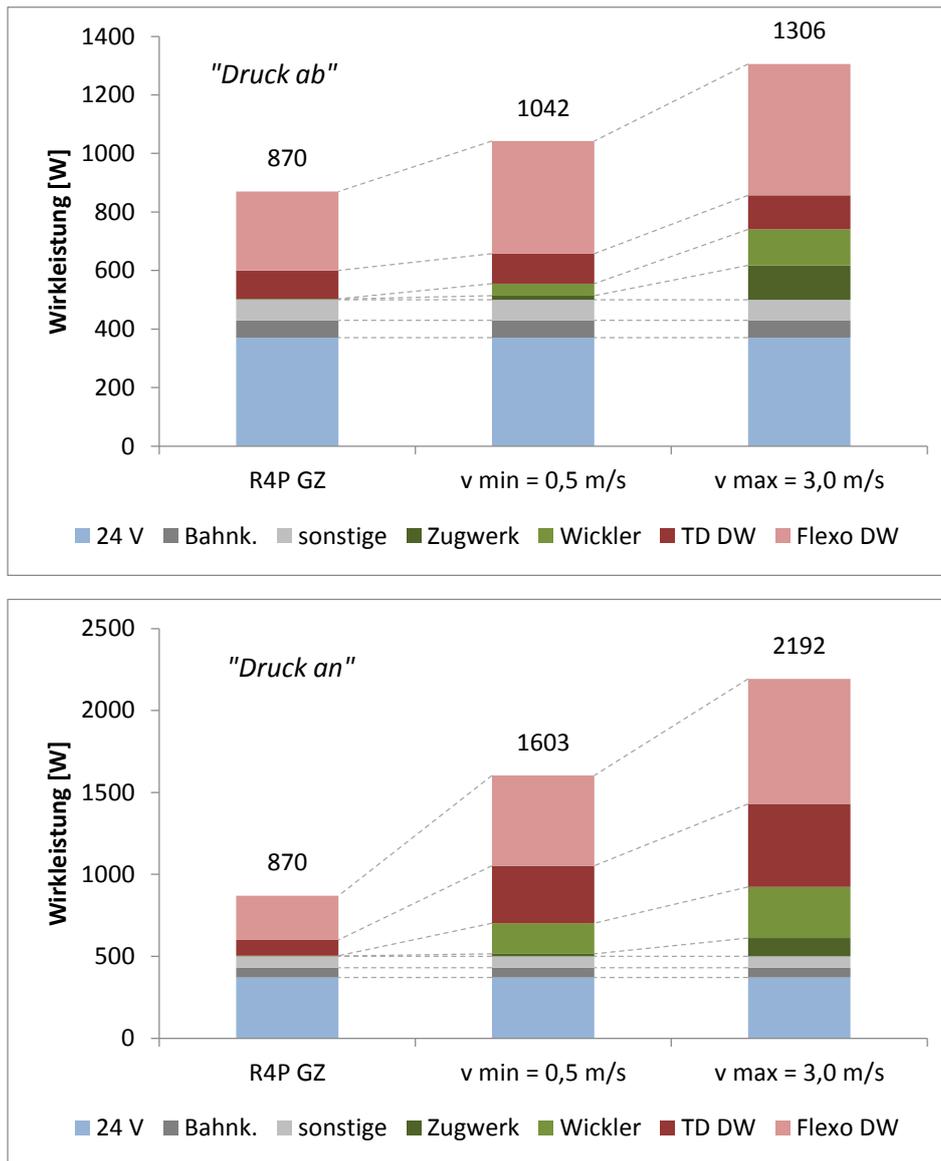


Abbildung 32: Einfluss der Maschinengeschwindigkeit auf die Leistungsaufnahme und -verteilung in der LaborMAN II bei „Druck ab“ und „Druck an“ beider Druckwerke mit Bahnlauf.

Die Leistungsaufnahme und -verteilung in der Druckmaschine im Grundzustand „Ready for Production“ wurde bereits beschrieben. Die Erhöhung der Maschinengeschwindigkeit führt sowohl bei „Druck an“ als auch „Druck ab“ zu erhöhten Leistungsaufnahmen der Antriebsmotoren beider Druckwerke (Asynchronmotoren). Gleichzeitig treten geschwindigkeitsabhängige Leistungsanteile der Synchronmotoren in den Zugwerken und Wicklern auf. Die Leistungsaufnahmen der 24-Volt-Elemente, der Bahnpositionierung sowie der sonstigen Verbraucher bleibt unverändert. Die Leistungsaufnahme der Zugwerke ist in beiden Betriebsmodi der Druckwerke nahezu gleich. In beiden Fällen erhöht sich die Leistungsaufnahme der Zugwerke von ca. 10 Watt bei geringster Leitachsgeschwindigkeit auf ca. 120 Watt bei maximaler Geschwindigkeit. Die Wickler weisen bei „Druck ab“ jeweils geringere Wirkleistungswerte auf als bei „Druck an“. Bei höheren Geschwindigkeiten sind die gemess-

senen Wirkleistungen jeweils größer. Bei „Druck an“ und 3 m/s Leitachsgeschwindigkeit werden in den Wicklern Leistungswerte von knapp über 300 Watt gemessen. Die Abwickler werden in beiden Versuchsreihen zumeist generatorisch betrieben, die Aufwickler motorisch.

Durch die Variierung der Betriebsmodi der Druckwerke ergeben sich die größten Veränderungen in der Leistungsaufnahme der *LaborMAN II* erwartungsgemäß im Bereich der Druckwerksantriebe. Die Antriebsleistung des Tiefdruckwerks bei „Druck ab“ liegt bei geringster Leitachsgeschwindigkeit bei ca. 100 Watt und steigt bei 3 m/s geringfügig auf ca. 120 Watt an. Bei „Druck an“ werden am Tiefdruckwerk Wirkleistungswerte von 350 Watt bei geringster und ca. 510 Watt bei größter untersuchter Leitachsgeschwindigkeit gemessen. Der Wechsel der Betriebsmodi führt im Tiefdruck-Druckwerk zu Mehrleistungen von 250 Watt (+250 %) bei langsamer Geschwindigkeit bzw. 390 Watt (+330 %) bei 3 m/s. Für die Antriebsmotoren des Flexodruckwerks werden bei „Druck ab“ für 0,5 m/s bzw. 3 m/s mittlere Leistungen von ca. 390 Watt bzw. 450 Watt gemessen. Die Leistungswerte steigen bei „Druck an“ und 0,5 m/s auf ca. 550 Watt oder um ca. 40 % an. Bei größter untersuchter Geschwindigkeit werden Leistungswerte im Flexodruckwerk von 760 Watt gemessen. Dies entspricht gegenüber „Druck ab“ einer Mehrleistung von ca. 310 Watt bzw. einer Erhöhung von ca. 70 %

Die Variierung der Pressungszustände im Flexodruckwerk ohne Papiertransport hat aus verbrauchstechnischer Sicht lediglich Einfluss auf die Leistungsaufnahme der Antriebsmotoren im Flexodruckwerk. Der Energiebedarf der übrigen Verbrauchergruppen bleibt annähernd unverändert, Abbildung 33.

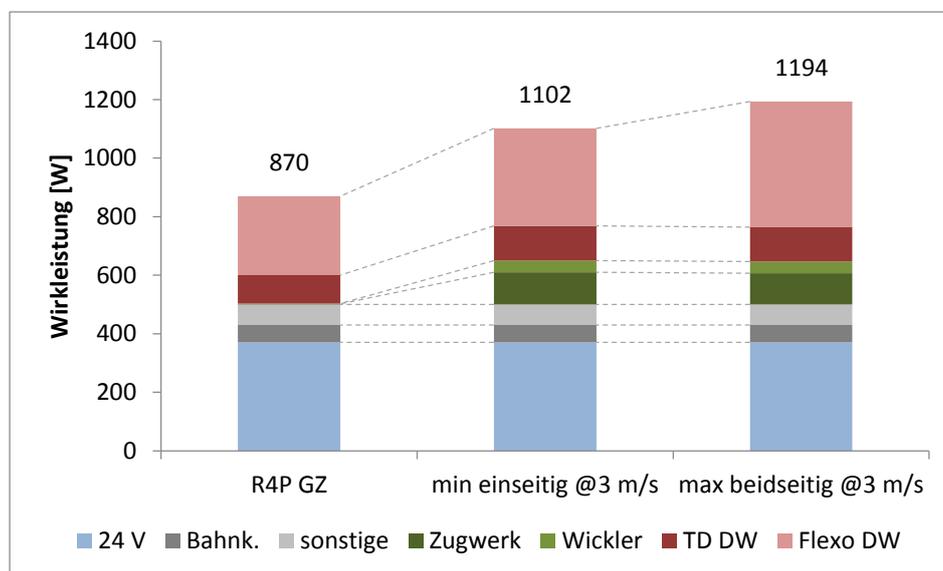


Abbildung 33: Einfluss von unterschiedlichen Pressungszuständen im Flexodruckwerk auf die Leistungsaufnahme und -verteilung in der *LaborMAN II*.

Bei einseitiger Pressung wird nur der mittlere Zylinder angestellt. Daraus folgt ein Kontakt zwischen mittleren und unteren Zylinder „*Druck an, einseitig*“. Wird zusätzlich der obere Zylinder angestellt entsteht ein weiterer Berührungspunkt zum mittleren Zylinder „*Druck an*“.

Die Umstellung von einseitiger auf zweiseitige Pressung beim Betrieb des Flexodruckwerks führt zu einer erhöhten Leistungsaufnahme des mittleren Antriebsmotors 7, siehe Abbildung 18, welche im Bereich von ca. 100 Watt liegt. Dies ist auf die Deformation des Gummibezugs zurückzuführen. Die übrigen Verbrauchergruppen weisen annähernd unveränderte mittlere Wirkleistungswerte auf.

Variationen der Bahnzugkräfte wurden in Konstant-Geschwindigkeitsversuchen durchgeführt. Zur Erinnerung sei nochmals erwähnt, dass die Ergebnisse dieser Versuchsreihe aufgrund der Messunterschiede, hauptsächlich resultierend aus den nicht vollständig reproduzierbaren Einstellungen und der damit verbundenen ausgegebenen Antriebsleistungen des Flexodruckwerks, in Abbildung 31 in eingeklammelter Form dargestellt wurden. Dennoch kann aus den Versuchsdaten der Einfluss der Bahnzugkraft extrahiert und die Veränderungen im Bereich der Leistungsverteilung zwischen den Maschinenkomponenten analysiert werden.

Abbildung 34 zeigt die Ergebnisse der Versuche mit der jeweils kleinsten sowie größten summierten Bahnzugkräften mit und ohne Druckbeistellung in den Druckwerken.

Bei „*Druck ab*“ und maximaler Bahnzugkraft ist die Leistungsaufnahme der Wickler im Vergleich zum Versuch mit minimaler Bahnzugkraft um ca. 40 Watt erhöht. Dieser Mehrverbrauch wird durch den Aufwickler verursacht, da der Abwickler über alle Versuche mit konstanter Wickelspannung betrieben wurde. Bei den Zugwerken wird bei maximaler Bahnzugkraft eine geringere Leistungsaufnahme am Einzugwerk, aber eine höhere Wirkleistung am Auszugwerk gemessen. Grund hierfür ist das Regelkonzept der Zugwerke. Das Einzugwerk unterliegt einer Downstream-Regelung und muss somit die Bahn bremsen, um die Bahnspannung zu erhöhen. Das Auszugwerk regelt wiederum in Upstream-Richtung und muss zur Erhöhung der Bahnspannung schneller drehen. Durch Erhöhung der Bahnzugkraft ergibt sich in Summe eine Verringerung der Leistungswerte der Zugwerke.

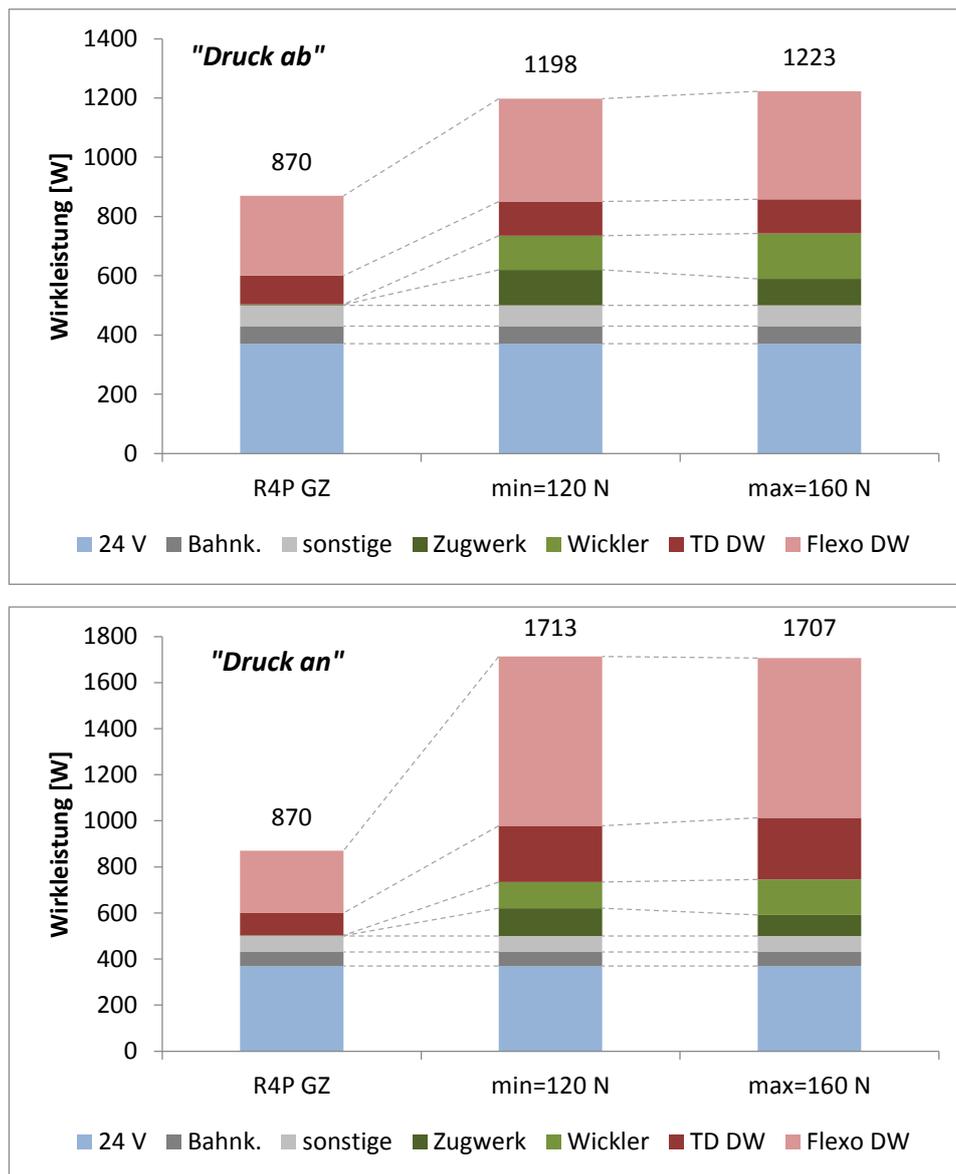


Abbildung 34: Einfluss der Variation der durch Wickler und Zugwerke aufgebrauchten Bahnzugkraft auf die Leistungsaufnahme und -verteilung in der LaborMAN II jeweils bei „Druck ab“ und „Druck an“, Phase III.

In den Versuchen bei „Druck ab“ wirken die Druckwerke nicht als Klemmstellen zur Materialbahn, sondern unterstützen lediglich den Bahntransport. Insgesamt führt die maximale Erhöhung der Bahnzugkräfte zu einem Leistungsunterschied von nur 25 Watt. Bei Wechsel der Betriebsmodi zu „Druck an“ bleiben die gemessenen Wirkleistungswerte der Wickler und der Zugwerke erwartungsgemäß für minimale und maximale Bahnzugkräfte nahezu unverändert, da sich in der Konfiguration dieser Achsen durch Druckbeistellung in den Druckwerken keine relevanten Änderungen ergeben. Im den Druckwerken führt die Erhöhung der Bahnzugkräfte bei „Druck an“ zu einem erhöhten Leistungsbedarf der Antriebsmotoren um mindestens 100 %. Bei maximaler Bahnzugkraft wurde am Tiefdruckwerk ein Mehrverbrauch von ca. 30 Watt gemessen. Da das Tiefdruckwerk mit angestellten Presseur als Klemmstelle agiert, ist kein Schlupf der Materialbahn möglich und die höhere Bahnspannung wirkt sich

direkt auf die Leistung des Antriebs aus. Das Flexodruckwerk wurde unter „Kiss Print“ mit deutlich geringerer Umschlingung betrieben. Aus diesem Grund ist im materialführenden Druckspalt zwischen Gummi- und Gegendruckzylinder trotz „Druck an“ weiterhin Materialschlupf möglich und es kann kein Einfluss der erhöhten Bahnzugkräfte auf die Antriebsleistung des Druckwerks verzeichnet werden.

Die Auswertung der Versuchsdaten zeigt für die Maschinenkonstellationen mit „Druck an“, dass der Einfluss der Bahnspannung vom Einfluss der Pressung überlagert ist und die Bewertung des Bahnspannungseinflusses in diesem Fall einer erhöhten Messunsicherheit unterliegt.

In Abschnitt 2.7 wurden die Ergebnisse der Wirkleistungsaufnahme der Gesamtmaschine bei variiertem Bahnlauf bereits dargestellt und analysiert. Die Leitwalzen waren aus bahntechnischer Sicht zwischen den beiden Druckwerken angeordnet. Es wurde gezeigt, dass die Wirkleistung der Maschine bei einer Bahngeschwindigkeit von 3 m/s um ca. 5 Watt pro zusätzlich im Bahnlauf integrierter Leitwalze ansteigt. Die Variation der Bahnführungen führt zu den in Abbildung 35 dargestellten Leistungsverteilungen in der *LaborMAN II*.

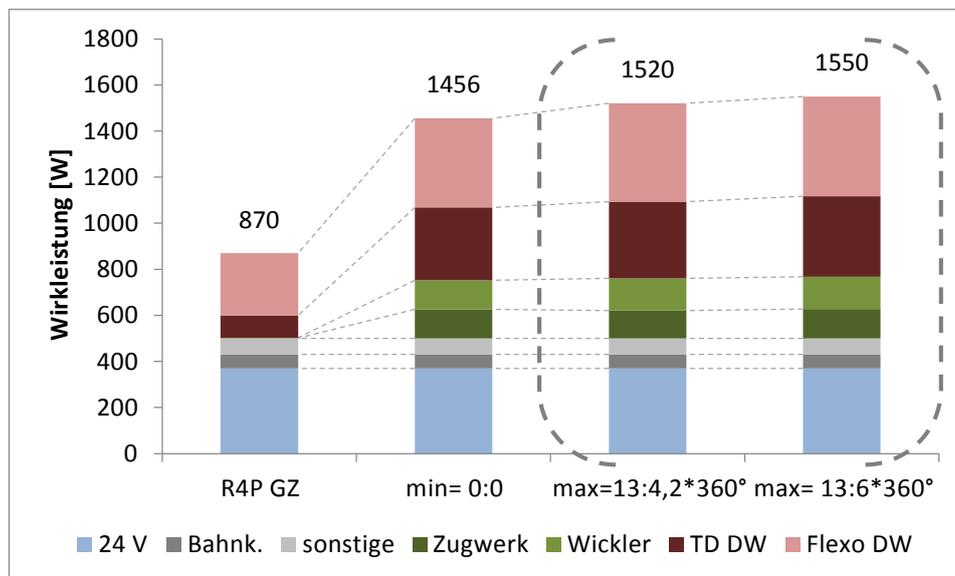


Abbildung 35: Einfluss von verschiedenen Bahnführungen (Anzahl zusätzlicher Leitwalzen : Umschlingungswinkel) auf die Leistungsaufnahme und -verteilung der *LaborMAN II* bei „Druck an“.

Die Umschlingung zusätzlicher Papierleitwalzen führt zu einer Erhöhung der Antriebsleistungen in beiden Druckwerken. Die Mehrleistung im Tiefdruckwerk zwischen direktem Bahnlauf und der 13 zusätzlich zu umschlingenden Anzahl an Papierleitwalzen liegt im Bereich von ca. 25 Watt. Für die Antriebe des Flexodruckwerks wird parallel eine Mehrleistung von ca. 45 Watt gemessen. Bei maximaler Anzahl zusätzlicher im Bahnlauf integrierter Papierleitwalzen wird zum Betrieb der Wickler ebenfalls eine geringe Mehrleistung im Bereich von ca. 15 Watt gemessen. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte aus den beiden in Ab-

bildung 35 dargestellten Versuchen mit je 13 zusätzlich umschlungenen Leitwalzen. Die mittlere Mehrleistung ergibt sich in diesem Fall zu ca. 80 Watt.

Der größte Einfluss auf die Gesamtleistungsaufnahme und somit auf den Energieverbrauch wurde bei Variationen der Pressung zwischen angetriebenen Zylindern im Flexodruckwerk gemessen, Abschnitt 2.8. In der Maschinensteuerung sind alle Achsen mit demselben Getriebeverhältnis zur virtuellen Leitachse hinterlegt. Aus den Versuchsergebnissen geht hervor, dass die Leistungsaufnahme des Gummizylinders, als auch des harten Zylinders mit zunehmender Durchmesserdifférenz ansteigt. Der Gummizylinder war dabei stets der Zylinder mit dem kleineren Durchmesser.

Der Zustand „min“ bezieht sich auf die kleinste Durchmesserdifférenz des Gummizylinders zu den berührenden harten Zylindern. Der Zustand „max“ bezieht sich demzufolge auf die maximale Durchmesserdifférenz, wobei der Gummizylinder immer der kleinste Zylinder im System Hart-Weich-Hart ist und sich der Spielraum der Durchmesserdifférenzen im Bereich von Zehntelmillimetern bewegt. Die Pressungen zwischen den Zylindern wurden weitestgehend identisch eingestellt. Da die in der Labordruckmaschine vorliegende Pressungseinstellung von Haus aus nicht präzise ist, sind die Werte nicht hundertprozentig reproduzierbar. Wie bereits erwähnt, können geringe Pressungsänderungen zu wesentlichen Änderungen in der Leistungsaufnahme und somit im Energieverbrauch führen. Aus diesem Grund wird eine Wiederholung der Versuche unter reproduzierbaren Bedingungen in naher Zukunft angestrebt. Dies könnte z. B. Bestandteil der anschließenden, noch zu beantragenden Projektphase sein. Die dargestellten Konfigurationen bilden die Extrema dieser Versuchsreihe ab, Abbildung 36.

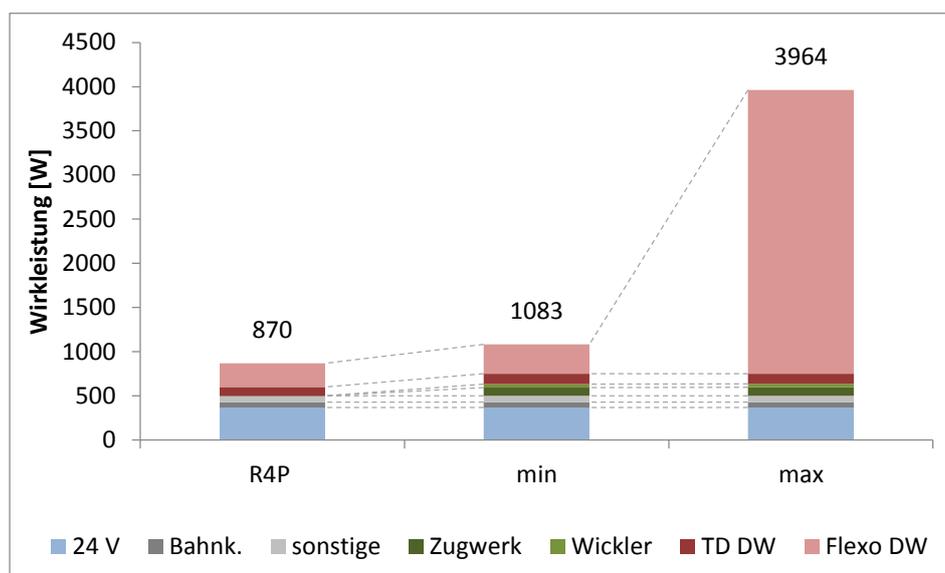


Abbildung 36: Einfluss von geringen Durchmesserdifférenzen an Wirkpaaren auf die Leistungsaufnahme und -verteilung der Antriebe in der LaborMAN II.

Im Diagramm ist ein deutlicher Unterschied der gemessenen Gesamtwirkleistungen der Maschine in der Konfiguration „Produktion“ im Zustand „min“ und „max“ zu sehen. Dabei handelt es sich bei genauerer Betrachtung nur um eine Änderung der Leistungsaufnahme des Flexodruckwerks. Das ist das Druckwerk, welches mit nicht optimalen Zylinderdurchmessern betrieben wird. Dieses Verhalten kann für die Zustandsüberwachung einer Offsetmaschine von Nutzen sein. Über die Leistungsaufnahme des Gummituchzylinders kann auf die Alterung (bzw. den Grad des Setzens) des Gummituchs geschlossen werden. Mithilfe dieser Information können Gummitücher gewechselt werden, bevor durch einen schlechten Abdruck Makulatur produziert wird. Bei richtiger Beurteilung des Zustands der eingesetzten Gummitücher vor Produktionsbeginn können ungeplante Produktionsstillstände verhindert werden.

Ein wichtiger Hauptverbraucher der Labordruckmaschine wurde in den durchgeführten Versuchsreihen nahezu unberücksichtigt gelassen und fand bei den Auswertungen bisher keine Berücksichtigung: der Trockner. Der am *pmTUC* vorhandene Trockner besteht aus insgesamt zwölf Luftherzern (Heizwendeln) in Verbindung mit vier Gebläsen. Der Aufbau entspricht also vom Prinzip her in guter Näherung einem Heißluftfön. Dabei weisen die Luftherzter Leistungswerte von je 7,5 kW auf. Die Leistungsaufnahme der Gebläse liegt bei je 2,2 kW. Zusammengefasst ergibt sich für den Trockner eine maximale Gesamtleistungsaufnahme von 98,8 kW.

Berechnet man aus den experimentell gemessenen Daten der Labordruckmaschine ohne die Beteiligung des Trockners bei „Druck an“ und einer Geschwindigkeit von 3 m/s und die Energieverteilung auf die typischen Komponenten, ergibt sich folgendes Bild, Abbildung 37.

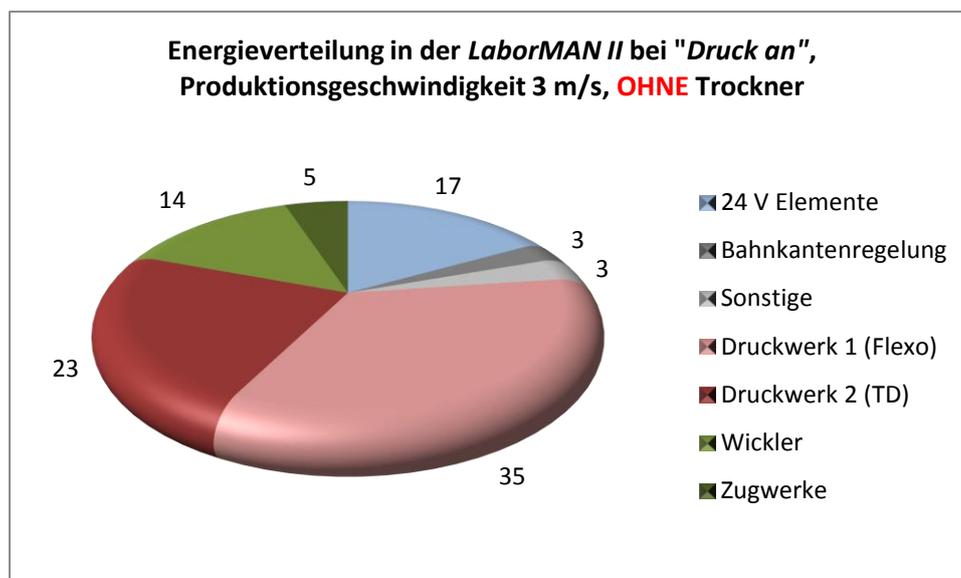


Abbildung 37: Energieverteilung in der Labordruckmaschine, LaborMAN II bei „Druck an“ und 3,0 m/s (Zustand 4) ohne Berücksichtigung des Trockners.

Ohne Berücksichtigung des Trockners in der Energiebilanz ergibt sich das bereits bekannte Bild. Zirka 58 % der Gesamtenergie werden für den Antrieb der Druckwerke benötigt, wovon ca. 35 % auf den Antrieb des Flexodruckwerks und 23 % auf den Antrieb des Tiefdruckwerks entfallen. Für die Antriebe der Wickler und Zugwerke sind in Summe ca. 19 % der Gesamtenergie aufzubringen. Einen weiteren Großverbraucher stellen die 24-Volt-Elemente dar, zu deren Betrieb ca. 17 % der Gesamtenergie benötigt werden. Jeweils 3 % der Gesamtenergie sind für die Bahnpositionierung und die sonstigen Verbraucher aufzuwenden. Der Gesamtverbrauch der Druckmaschine beträgt insgesamt ca. 2190 Watt, siehe auch Abbildung 31, Zustand 4, Grundprofil.

Bei allen durchgeführten Versuchen bzw. Versuchsvariationen mit aktivem Bahnlauf wurde der Energieverbrauch beim Drucken stets ohne Farbe gemessen. Demzufolge ist auch der energieaufwendige Prozess des Trocknens in dieser Projektphase nicht untersucht worden.

Das An- bzw. Abschalten der Heizwendel im Trockner erfolgt durch die Trocknersteuerung. In einer einfachen Messung mit einer Stromzange wurden über der Zeit veränderliche, stets wiederkehrende Stromstärken beobachtet. Für eine genaue Analyse des Energieverbrauchs des Trockners sind exakte Messungen des Stromverlaufs notwendig. Somit ist die Berechnung der Energieverteilung an dieser Stelle nicht sinnvoll.

Detaillierte Untersuchungen mit unterschiedlichen Druckmedien unter Mitberücksichtigung des Trockners sind Bestandteil der anschließenden Projektphase.

2.10 RANKING DER UNTERSUCHTEN EINFLUSSPARAMETER AN DER LABORDRUCKMASCHINE AUF DEN ENERGIEVERBRAUCH

Durch einen Quervergleich der gesamten Versuchsergebnisse lässt sich ein Ranking der Einflussparameter auf die Leistungsaufnahme und somit auf den Energieverbrauch der Druckmaschine generieren. Hierzu ist es zunächst notwendig, einen geeigneten vollständig vergleichbaren Referenzversuch mit festgelegten Versuchsbedingungen zu definieren. Als Referenzversuch dient der Grundversuch mit Bahntransport bei „*Druck an*“ in beiden Druckwerken, deren Wirkleistung bei 3 m/s mit 2192 Watt gemessen wurde.

Tabelle 7 zeigt das Ranking der Einflussparameter auf den Gesamtenergieverbrauch der *LaborMAN II*.

Dargestellt sind die wichtigsten Versuchskonfigurationen und die gemessenen Gesamtleistungen. Die Kenngröße ΔP_{REF} berechnet sich aus der Wirkleistungsdifferenz im Vergleich zum Referenzversuch. Der Kennwert ΔP_{Effekt} beschreibt die Leistungsdifferenz untersuchter Grenzzustände. Durch gezielte Variation verschiedener Maschinen- und Prozessparameter könnten in Relation zum Referenzzustand Energiemehrverbräuche provoziert werden.

Tabelle 7: Ranking der Einflussparameter auf den Energieverbrauch der LaborMAN II.

Grundzustände	Erläuterung	v	p_{Fl}	p_{TD}	BL	P_W	ΔP_W [W]	ΔP_W [%]
HS Ein / Standby	Hauptschalter ein	-	-	-	-	500	-	-
R4P	Ready for Production	-	-	-	-	870	-	-

Variationsparameter	Erläuterung	v	p_{Fl}	p_{TD}	BL	P_W	ΔP_{REF} [W]	ΔP_{REF} [%]
REFERENZ	„Druck an“	3	on	on	ja	2192	-	-
Betriebsmodus Trockner	aus / an 4 Gebläse a 2,2 kW 12 Heizwendel a 7,5 kW					k.A.	k.A.	k.A.
Hart-Weich-Zylinderpaarung	4 Gummitücher; Durchmesserunterschiede von Gummizylinder zu Gegendruckzylinder / Aniloxzylinder	3	on	off	nein	3964	+1772	+81
Anpressdrücke	„Druck ab“	3	off	off	ja	1306	-886	-40
Leitachsgeschwindigkeit	„Druck an“	0,5	on	on	ja	1603	-589	-27

Effekte / Einflüsse	Erläuterung	v	p_{Fl}	p_{TD}	BL	P_W	ΔP_{Effekt} [W]	ΔP_{REF} [%]
Bahntransport+ Pressung TD und Flexo on	„Druck an“, Bahntransport	3	on	on	-	-	+450	+21
Bahntransport	„Druck ab“, Bahntransport	3	off	off	-	-	+200	+9
zusätzliche Papierleitwalzen (0...13)	„Druck an“	3	on	on	ja		+66	+3
Bahnspannung	„Druck ab“/„Druck an“ Summe Zugkräfte: min. 120 N, max. 160 N	3	off	off	ja		+13	+0,6
		3	on	on	ja		+6	+0,3
Motorkühlung	Kühlung, statisch Kühlung, dynamisch	-	-	-	-	-	+100	+5
							+600	+27

Variationen innerhalb der Druckwerke	Erläuterung	v	p_{Fl}	p_{TD}	BL	P_W	ΔP_{Effekt} [W]	ΔP_{REF} [%]
Pressungszustände zwischen motorischen Achsen (hart-weich-hart)	„Druck ab“	3	off	off	nein	767		
	„Druck an, einseitig“	3	on	off	nein	1102	+335	-(*)
	„Druck an“	3	on	off	nein	1194	+427	-(*)

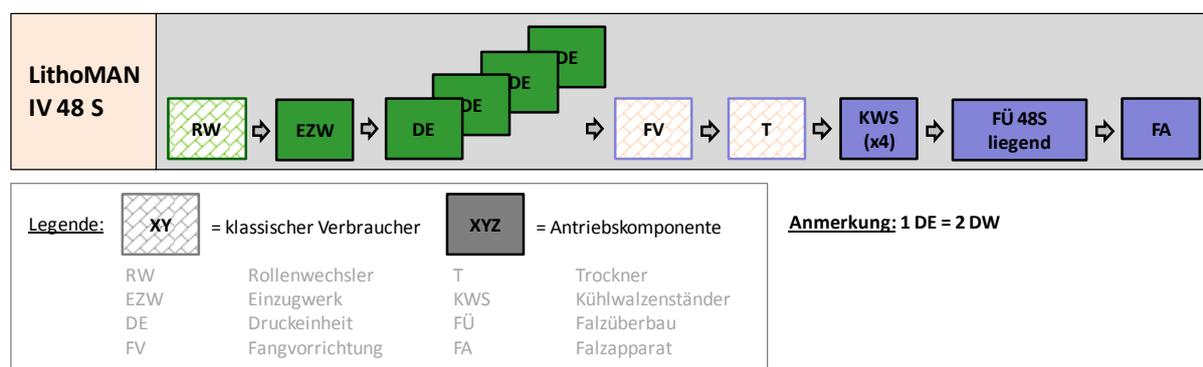
(*) nicht sinnvoll anzugeben in Relation zum Referenzversuch mit drucktypischen Einstellungen.

Der direkte Vergleich der Ergebnisse verdeutlicht, dass der Prozessparameter „Pressung im Druckspalt“ mit Abstand den größten Einfluss auf den Energieverbrauch der Druckwerksantriebe hat. Erhöhungen der Bahnspannungen oder Umschlingungen nicht angetriebener Leitwalzen im Bahnlauf resultieren ebenfalls in einem energetischen Mehrverbrauch, jedoch ist dieser im Labormaßstab eher als marginal anzusehen. Die dargestellten Ergebnisse lassen sich in das zu generierende Maschinen- bzw. Energiemodell transferieren.

2.11 VERSUCHSERGEBNISSE AN DER PRODUKTIONSMASCHINE *LITHOMAN IV*

Zur Verifikation der Ergebnisse wird eine 48 Seiten *LITHOMAN IV* Produktionsmaschine eingesetzt, welche bei der *Jungfer Druckerei und Verlag GmbH* in Herzberg installiert ist. Die Maschine wurde von der *MAURER SERVICES GmbH* nach Kundenwunsch modifiziert, aufgebaut und in Betrieb genommen. Die Druckmaschine ist mit Einzelantrieben ausgestattet und weist steuerungs- sowie antriebsseitig den aktuellen Stand der Technik auf.

Abbildung 38 zeigt das Maschinenschema der *LITHOMAN IV 48S* der *Jungfer Druckerei und Verlag GmbH*.



Energiemesspunkte:

Abkürzung	Beschreibung
DE 2	Druckeinheit 2 (entspricht DW 3 und DW 4)
ESP DE	Einspeisung Druckeinheiten (Druckeinheiten 1 bis 4) + KWS + EZW
FA MAN	Falzapparat MAN
ESP FA	Einspeisung Falzapparat (Falzüberbau + 2 Falzapparate)

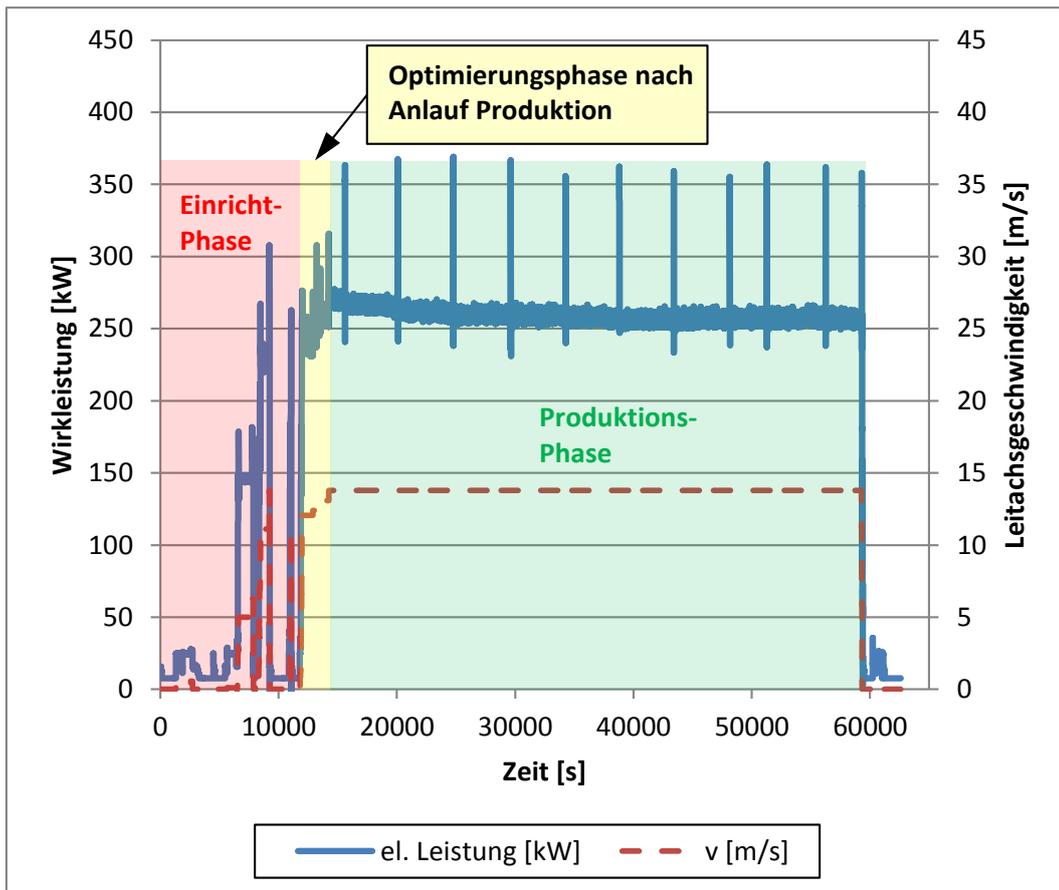
Abbildung 38: Maschinenschema der Produktionsmaschine *LITHOMAN IV*, *Jungfer Druckerei und Verlag GmbH*.

Die Produktionsmaschine besteht in Papierlaufrichtung aus den Komponenten Rollenwechsler, Einzugwerk, vier Druckeinheiten, Fangvorrichtung, Trockner, Kühlwalzenständer, Falzüberbau und Falzapparat. Schön- und Widerdruck erfolgen je in einer Druckeinheit. Eine Druckeinheit besteht demzufolge aus zwei Druckwerken. Die Weiterverarbeitung der Druckprodukte wie Bündeln, Verpacken und Abtransport, zählen, energetisch betrachtet, nicht zur untersuchten Druckmaschine.

Ursprünglich war die Integration der Messtechnik und der dazugehörigen Programmstruktur an der Produktionsmaschine für Ende 2016 vorgesehen. Ein für den Umbau notwendiger Maschinenstillstand konnte in der saisonalen Produktionshochphase nicht realisiert werden. Um diese Stillstandzeit zu reduzieren und den Einfluss von Fehlern im Messprogramm auf den Produktionsprozess zu vermeiden wurde die Messwerterfassung komplett von der Maschinensteuerung entkoppelt.

Anders als in der Labordruckmaschine wurden die Leistungsmessklemmen nicht im Sercos-Kreis der Maschinensteuerung, sondern in einer zusätzlichen Steuerung mit separatem Feldbus installiert. Die für die nun Messtechnik notwendige separate Steuerung (MLC) war im ursprünglichen Projekt nicht vorgesehen und musste separat beschafft werden. Nach Vorbereitung der Messinfrastruktur und Installation in die Schaltschränke musste für die Verdrahtung ein Maschinenstillstand mit abgeschalteter Stromzufuhr abgewartet werden. Nach erfolgter Inbetriebnahme konnte der *Data Analytics Server (DAS)* zum Aufzeichnen und Verwalten der Daten eingerichtet werden. Da die Entwicklung der verwendeten Software der *Bosch Rexroth AG* noch nicht abgeschlossen war, lief der Transfer von der Labor- auf die Produktionsmaschine nicht reibungslos. Der *DAS* musste nun zeitgleich mit zwei Maschinensteuerungen und der zusätzlichen Steuerung der Messtechnik kommunizieren. Verbindungsaufbauprobleme und Kommunikationsabbrüche waren die Folge. Als Ursache stellten sich hier systeminterne Inkompatibilitäten zwischen unterschiedlichen Firmware-Versionen der drei Steuerungen heraus. Diese Kommunikationsprobleme zwischen dem *DAS* und den *MLC*'s verursachte trotz intensiver Zusammenarbeit mit *Bosch Rexroth* eine Verzögerung von mehreren Monaten, sodass erste vollständige Datenaufzeichnungen an der Produktionsmaschine erst im Juni 2017 realisiert werden konnten. Aus der darauffolgenden 6-wöchigen Datenaufzeichnung soll nun beispielhaft ein repräsentativer Produktionsverlauf vorgestellt werden.

In Abbildung 39 ist der Wirkleistungsverlauf der *LITHOMAN IV 48S* Druckmaschine, vom Einzug über die Druckeinheiten, dem Falzüberbau bis zum Falzapparat, dargestellt. Parallel dazu sind in der tabellarischen Zusammenstellung die charakteristischen Merkmale der unterschiedlichen Produktionsphasen mit deren Zeitdauern zusammengefasst. Die thermische Leistungsaufnahme des Trockners ist in diesem Diagramm nicht inkludiert. Der Rollenwechsler hat ebenfalls eine separate Einspeisung und wurde nicht erfasst. Es wurden insgesamt vier Messpunkte zur Erfassung der Leistungsaufnahme definiert: Druckeinheit 2, die Gesamtleistungsaufnahme aller 4 Druckeinheiten plus Einzugwerk und Kühlwalzenständer, der Falzüberbau inklusive Falzapparate und der große *MAN-Falzapparat* einzeln. Aus diesen Einzelmessungen lässt sich die Leistungsaufnahme der Gesamtmaschine berechnen.



<u>Phase</u>	<u>Kennzeichnende Merkmale</u>	<u>Dauer</u>
Einrichtung	<ul style="list-style-type: none"> - Druckplattenwechsel in Druckwerken - Reinigung und Kontrolle der Maschine - Papiereinzug - Druckvorbereitung bei geringer Maschinengeschwindigkeit - Farbauftrag, Farbintensität, Farbsättigung - Kontrolle Bahn / Produkttransport - Kontrolle Registermarken, Schnittkanten, Schnittmarken - Kontrolle Falzmarken - <i>optional: Kontrolle Klebung, Heftung</i> 	ca. 3,3 Std.
Optimierungsphase nach Anlaufen der Produktion	<ul style="list-style-type: none"> - Erhöhung Maschinengeschwindigkeit auf Produktionsgeschwindigkeit 	ca. 40 Min.
Produktion	<ul style="list-style-type: none"> - Herstellung von Druckprodukten mit konstanter Qualität bei größtmöglicher Maschinengeschwindigkeit - In Situ Kontrollen: <ul style="list-style-type: none"> o Farbdichte, Farbregister, Schnittregister usw. - regelmäßig durchgeführte Waschvorgänge der Gummitücher in den DW (Peaks) 	ca. 12,5 Std.
Produktionsende	<ul style="list-style-type: none"> - Abbremsen 	< 1 Min.

Abbildung 39: Repräsentativer Produktionsablauf der Rollenoffsetdruckmaschine LI-THOMAN IV, Jungfer Druckerei und Verlag GmbH.

Im Diagramm ist ein Produktionsintervall von ca. 16,5 Stunden dargestellt, welches die Phasen des Einrichtens, des Hochlaufens inklusive Optimierung, der Produktion und des Abfahrens beinhaltet. Die Abtastrate der Datenaufzeichnung beträgt 2 Sekunden. Die Produktionsgeschwindigkeit liegt bei knapp 14 m/s oder 40 000 Druckzylinderumdrehungen pro Stunde. Eine Umdrehung entspricht in Sammelproduktion einem Produkt mit 48 Seiten A4 und bei ungesammelter Produktion zwei Produkten mit 24 Seiten A4, jeweils 4/4-farbig. Der Umfang der Druckzylinder beträgt 1240 mm (vgl. Labormaschine: 691 mm), die geförderte Papierbahnbreite liegt bei 1460 mm (vgl. Labormaschine: 140 mm).

Die Einrichtungsphase dient der Vorbereitung der Maschine auf den Druckprozess und beginnt mit dem Einbau der Druckplatten in die Druckwerke in Verbindung mit dem Einstellen der Produktionsparameter. Die Leistungsaufnahme der Maschine liegt – bis auf die kurzzeitigen Erhöhungen der Maschinengeschwindigkeit – zwischen ca. 10 kW und 30 kW. Nach erfolgter Produktionsparametereinstellung und Kontrolle der Druckparameter erfolgt die Beschleunigungs- und Optimierungsphase aller prozessrelevanten Parameter des Drucks sowie der gesamten Druckanlage. Unter stetig durchgeführten Produktkontrollen wird die Maschinengeschwindigkeit in einem Intervall von insgesamt ca. 40 Minuten von Einrichtungsgeschwindigkeit schrittweise auf Produktionsgeschwindigkeit von ca. 13,8 m/s erhöht. Dieses Zeitintervall ist unterschiedlich lang, hängt von vielen Einflussparametern ab und ist somit als nicht repräsentativ anzusehen. Die Wirkleistung der Druckanlage steigt deutlich an und erreicht – ohne Berücksichtigung der erkennbaren Spitzenlasten (Peaks) – Maximalwerte von ca. 280 kW.

In der Produktionsphase werden – bei optimal eingestellten Produktionsparametern und größtmöglicher Maschinengeschwindigkeit – Druckprodukte mit konstanter Qualität hergestellt. Die Produktionsphase weist eine Dauer von ca. 12,5 Stunden auf. Die mittlere elektrische Wirkleistungsaufnahme berechnet sich zu ca. 260 kW, wobei die Spitzenbelastungen (Peaks) ebenfalls nicht berücksichtigt sind.

Die in regelmäßigen Abständen erkennbaren Peaks entstehen infolge durchgeführter Waschvorgänge der Gummitücher in den Druckwerken. In diesen, nur wenige Sekunden dauernden Prozessen, werden Spitzenlasten von knapp 370 kW erreicht. Das entspricht gegenüber der normalen Produktion einem Mehrverbrauch von ca. 85 kW. In den Druckwerken werden zur Reinigung der Gummitücher in Reinigungsmodulen Walzen mit vorgetränkten Reinigungstüchern hydraulisch angestellt. Dabei entsteht im Vergleich zum normalen Betrieb zusätzliche Reibung, welche in den Druckwerken durch die Antriebsmotoren mit höheren Leistungsanforderungen und damit höheren Energieverbräuchen kompensiert werden müssen.

An dieser Stelle muss nochmals betont werden, dass bei dem in Abbildung 39 dargestellten Gesamtwirkleistungsverlauf trocknerseitig lediglich die elektrische Energie beinhaltet ist, welche für den Betrieb der Ventilatoren benötigt wird. Der zur Trocknung der Druckprodukte benötigte thermische Heißluftvolumenstrom wird bei der hier untersuchten Druckanlage auf besonders energieeffiziente Art und Weise zur Verfügung gestellt, auf welche zu einem späteren Zeitpunkt detailliert eingegangen wird. Dabei kann die thermische Energieversorgung des Trockners von Erdgasbetrieb auf die Nutzung der Abwärme einer Gasturbine umgestellt werden.

Die elektrische Leistung des Trockners ist abhängig vom Betriebszustand des Trockners bzw. dessen Temperatur. Die Regelung erfolgt über die programmierte Maschinensteuerung des Trocknerherstellers. Durch Überschreiten einer betriebscharakteristischen Maschinengeschwindigkeit (Anzahl Zylinderumdrehungen pro Stunde) schalten die elektrisch betriebenen Gebläse ein. Die elektrische Wirkleistung des Trockners in der gesamten Produktionsphase ist konstant. Nach dem Erreichen der Soll-Produktzahl wird die Produktion durch Abbremsen der Maschine beendet. Das Anhalten der Maschine wird typischerweise innerhalb wenigen Sekunden, hier weniger als 60 Sekunden, realisiert. Nach dem planmäßig realisierten „*Stopp*“ zum Produktionsende beginnt die erneute Einrichtungsphase für den anschließend erfolgenden Druckauftrag.

An der Labordruckmaschine konnte ein linearer Zusammenhang zwischen dem Gesamtenergieverbrauch und der Maschinengeschwindigkeit festgestellt werden, vergleiche hierzu Abbildung 11, Abbildung 14 und Abbildung 17. Bei dem nur wenige Sekunden dauernden „*Hochfahren*“ ergibt sich für die Produktionsmaschine der in Abbildung 40 dargestellte Wirkleistungsverlauf der einzelnen Komponenten.

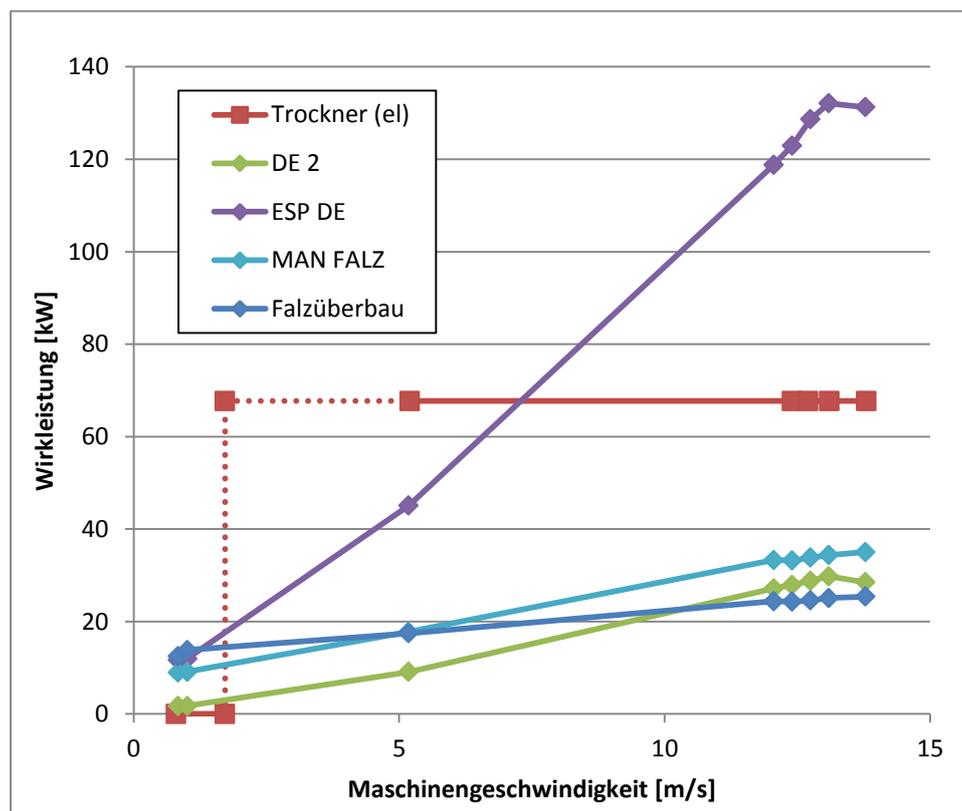


Abbildung 40: Wirkleistungsverlauf der Einzelkomponenten über verschiedenen Geschwindigkeiten beim „*Hochfahren*“ vor dem Anlaufen der Produktion, LITHOMAN IV, Jungfer Druckerei und Verlag GmbH.

Anhand der Geschwindigkeiten während des Hochfahrens sind in guter Näherung lineare Zusammenhänge zwischen Leistungsbedarf und Maschinengeschwindigkeit für die Verbrauchergruppen MAN-Falz und Falzüberbau, Druckeinheit 2 (stellvertretend für die Druckeinheiten 1 bis 4) sowie die Einspeisung der Druckeinheiten erkennbar. Bei Druckeinheit 2 bzw. beim Gesamtverbrauch der Druckeinheiten an der Einspeisung ist ersichtlich, dass die Werte bei maximaler Geschwindigkeit bzw. an dem Messpunkt, bei welchem die Produktionsgeschwindigkeit erreicht ist unterhalb des extrapolierten Trends der geringeren Geschwindigkeiten liegen. Beim Erreichen der Produktionsgeschwindigkeit müssen die Druckwerke keine Beschleunigungsleistung des Systems oder Überwindung der Massenträgheit beim Beschleunigen verrichten. Das System geht vom transienten Betrieb beim Beschleunigen in den Konstantlauf bei Produktion (Gleichgewichtszustand) über. Der Anstieg der Wirkleistung des Falzüberbaus ist vom Verlauf her flacher im Vergleich zu Druckeinheit 2 und dem Falzapparat.

Eine andere Leistungscharakteristik stellt sich für den Trockner dar. Die Leistung wird für den Antrieb der Gebläsemotoren benötigt. Die Gebläsemotoren sind bei kleinen Bahngeschwindigkeiten bzw. geringen Druckzylinderumdrehungszahlen nicht aktiv und werden beim Erreichen einer Grenzdrehzahl automatisch angeschaltet. Der Verbrauch ist im weiteren Verlauf unabhängig von der Maschinengeschwindigkeit. Aus diesem Grund wird die Verbrauchslinie des Trockners zwischen den Messpunkten bei 1 m/s und 5 m/s gestrichelt dargestellt. Bei aktivierten Gebläsen wird am Trockner eine Leistung von ca. 70 kW gemessen. Somit stellen die Druckwerke und der Trockner die größten elektrischen Verbrauchergruppen in der *LITHOMAN IV 48S* dar.

Für die Produktionsphase – der wichtigsten Betriebsphase der Anlage – soll der Leistungsbedarf nochmals detailliert betrachtet werden. Im grün gekennzeichneten Bereich von Abbildung 39 wurde eine Produktionsgeschwindigkeit von knapp 14 m/s gefahren. Abbildung 41 zeigt in dieser Phase den Wirkleistungsverlauf eines Druckwerks sowie die zusätzlich eingezeichnete Entwicklung der Temperatur des Antriebsmotors.

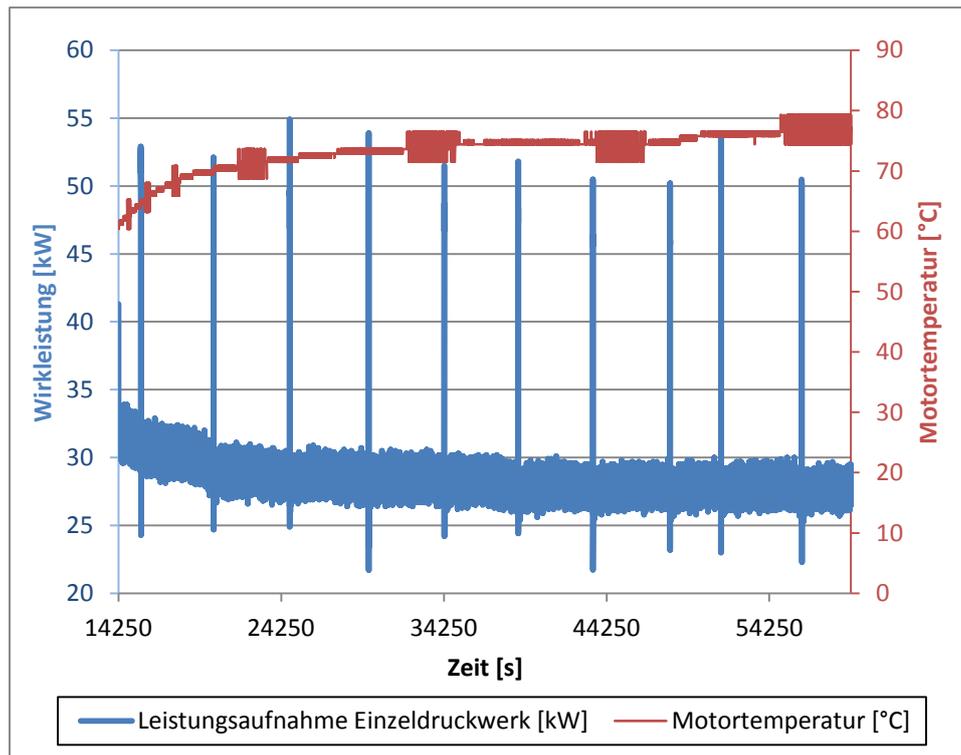


Abbildung 41: Leistungsverlauf und Motortemperatur eines Druckwerkes in der Produktionsphase mit konstanter Geschwindigkeit von knapp 14 m/s der LITHOMAN IV, Jungfer Druckerei und Verlag GmbH.

Vernachlässigt man zunächst die durch die Waschvorgänge auftretenden Spitzenbelastungen von Druckwerk 2, so ist über der Zeit ein leicht degressiv ausgeprägter Verlauf erkennbar. Das bedeutet, dass das Druckwerk 2 mit zunehmender Produktionszeit weniger Leistung verbraucht. Werden bei Produktionsbeginn Wirkleistungen von ca. 32 kW gemessen, so beträgt die durchschnittlich gemessene Wirkleistung nach ca. 6 Stunden, oder 21600 Sekunden später, ca. 28 kW. Das entspricht einer Verringerung von 4 kW oder einer Leistungsreduktion von immerhin 12,5 % im Vergleich zum Produktionsbeginn. Der durchschnittliche Leistungsbedarf von ca. 28 kW verläuft annähernd konstant bis zum Produktionsende.

Genau gegenläufig erweist sich die Entwicklung der erfassten Temperatur des Antriebsmotors. Diese beträgt bei Produktionsbeginn ca. 60 °C und steigt mit zunehmender Produktionszeit an. Die Temperaturzunahme verringert sich mit zunehmender Produktionszeit stetig. Die größten Temperaturen des Antriebsaggregats werden gegen Produktionsende mit knapp 80 °C erreicht. Diese Darstellung führt zu der Erkenntnis, dass der verringerte Energieverbrauch des Druckwerks mit der zunehmenden Produktionszeit bei vollständiger Auslastung zusammenhängt. Ansteigende Temperaturen führen – wie bei vielen reibungsbehafteten technischen Systemen oder Maschinen zu einer Verringerung der Reibung und somit zu einem reduzierten Leistungswerten und damit zu einem reduzierten Energieverbrauch. Hier spielen aber auch drucktechnische Aspekte eine entscheidende Rolle. Zu Produktionsbeginn sind die Druckwerke kalt oder aufgrund des temporären Stillstands lediglich kälter. Die Druckwerke müssen bei geringeren Betriebstemperaturen höhere Walkarbeit beim Ablaufen der gummier-

ten Walzen verrichten. Die rheologischen Eigenschaften der Druckfarbe sind ein weiterer Faktor. Druckfarben sind strukturviskos. Die Viskosität sinkt mit zunehmender Scherrate und Temperatur. Daraus resultiert, dass die Farbe bei geringerer Temperatur und höherer Viskosität schlechter spaltet, woraus eine höhere Leistung zum Betrieb des Druckwerks im kälteren Zustand im Vergleich zu wärmeren Zuständen aufzubringen ist.

Die im Leistungsverlauf zuvor ausgenommenen Lastspitzen, resultieren aus Waschzyklen, bei welchen Walzen mit vorgetränkten Tüchern pneumatisch angestellt werden, um Papierstaub, Farb- und Feuchtmittelreste vom Gummituch zu entfernen. Die im Vergleich zum normalen Produktionsbetrieb zusätzlich auftretenden Reibungseffekte führen in den Antriebsmotoren der Druckwerke zu deutlich erhöhten Verbräuchen.

Eine detaillierte Darstellung der Leistungsverläufe in Druckeinheit 2 während der Waschvorgänge sind in Abbildung 42 dargestellt. Ein zusammenfassendes Diagramm sowie die gemessenen Zahlenwerte von Wasch- als auch Produktionszyklen sind in Abbildung 43 ersichtlich.

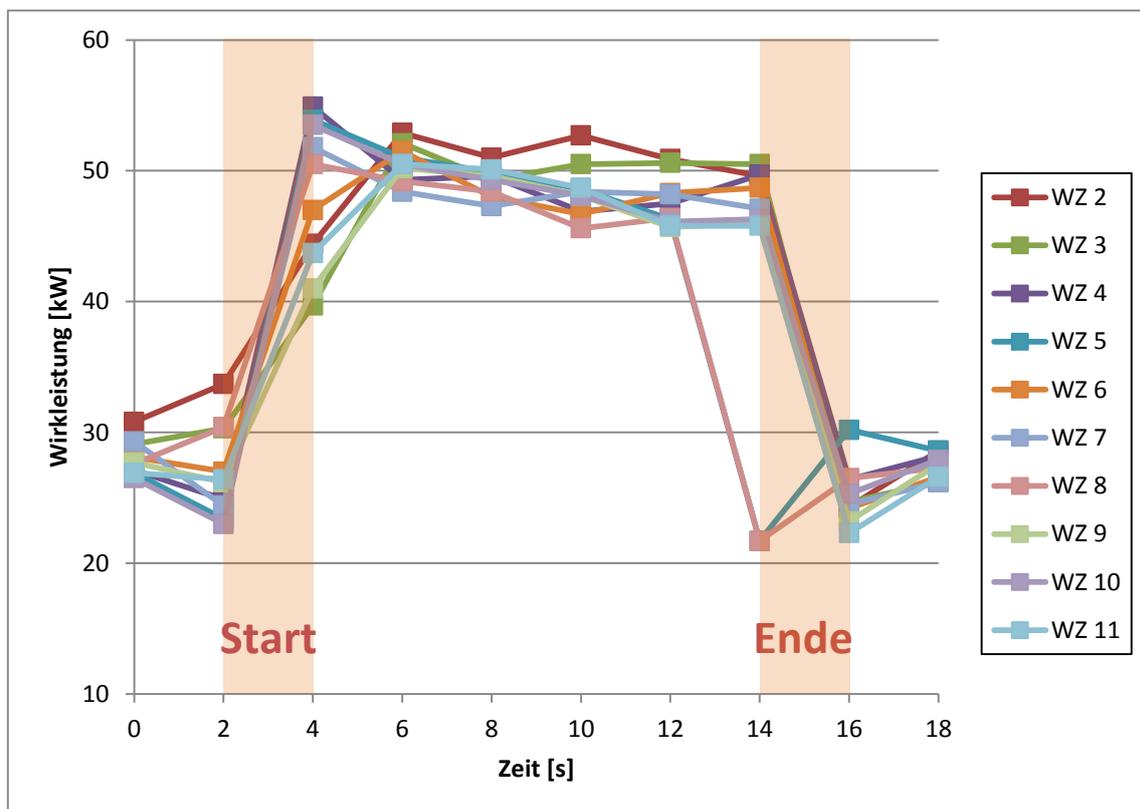
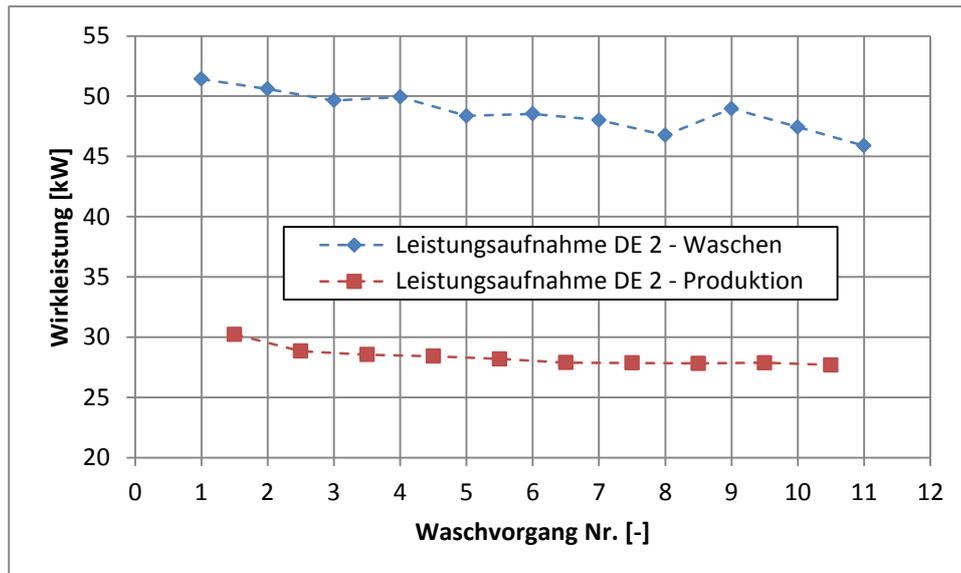


Abbildung 42: Detaillierte Darstellung der erhöhten Leistungsaufnahme durch Waschen der Gummituchzylinder, LITHOMAN IV, Jungfer Druckerei und Verlag GmbH.

Der mittlere Abstand zwischen den einzelnen Waschungen in der Produktionsphase beträgt ca. 72 Minuten (± 10 min), siehe Abbildung 39 und Abbildung 41. Die mittlere Dauer der Waschvorgänge beträgt ca. 12 Sekunden (± 2 s). Während des Gummituchwaschens steigt der mittlere Leistungsbedarf von ca. 28 kW bei normaler Produktion um 21 kW auf durchschnittlich 49 kW an. Das entspricht einer Mehrleistung von 75 %. An der Einspeisung der

Druckeinheiten, welche die summierte Leistungsaufnahme der vier Druckeinheiten (8 Druckwerke), des Einzugwerks und des Kühlwalzenständers wiedergibt, berechnet sich während der Produktion eine Gesamtleistung von 131 kW. Postuliert man für alle Druckeinheiten die gleiche Leistungsaufnahme wie für Druckeinheit 2 und betrachtet die Komponenten Einzugwerk und Kühlwalzenständer als Konstantverbraucher mit einer (herausgerechneten) Leistungsausnahme während der Produktion von 19 kW, ergibt sich während der Waschzyklen an der Einspeisungsstelle der Druckeinheiten eine Gesamtleistungsaufnahme von 215 kW.



	DE 2	ESP DE (inkl. EZW+KWS)	KWS+EZW
Mittelwert Produktion [kWh]	28	131	19
Mittelwert Waschen [kWh]	49	215	(19)
Differenz [kW]	21	84	(0)
Differenz [%]	75	-	(0)

Abbildung 43: Leistungsaufnahme Druckeinheit 2 und Einspeisung Druckeinheiten bei Waschvorgängen im Vergleich zur reinen Produktion, LITHOMAN IV, Jungfer Druckerei und Verlag GmbH.

Aus den dargestellten Leistungsdaten der LITHOMAN IV lässt sich folgende Energieverteilung der unterschiedlichen Baugruppen bzw. Verbrauchergruppen während der Produktionsphase ableiten.

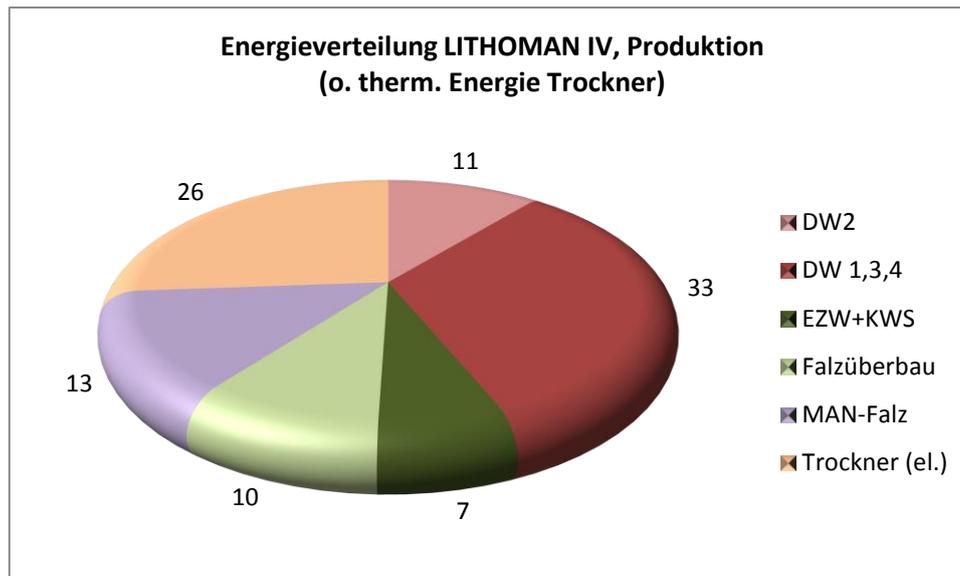


Abbildung 44: Verteilung des Energieverbrauchs während der Produktionsphase auf die einzelnen Komponenten, LITHOMAN IV, Jungfer Druckerei und Verlag GmbH.

Aus dieser Darstellung ist zu erkennen, dass die Druckwerke die größten elektrischen Energieverbraucher sind, welche insgesamt betrachtet ca. 44 % des Gesamtenergiebedarfs einnehmen. Der zweitgrößte elektrische Verbraucher ist der Trockner mit einem Anteil von 26 % am Gesamtenergieverbrauch. Für den Betrieb des MAN-Falzapparats werden 13 % der Gesamtenergie verbraucht. Der Energieanteil des Falzüberbaus am Gesamtverbrauch liegt bei 10 %. Die verbleibenden 7 % entfallen dann auf die beiden Komponenten Einzugswerk und Kühlwalzenstände.

Bei den bisher an der *LITHOMAN IV* durchgeführten Energiemessungen und –auswertungen wurde lediglich der rein elektrische Leistungs- bzw. Energieverbrauch analysiert. Ein viel aussagekräftigeres Gesamtbild ergibt sich erst unter Einbeziehung des thermischen Energieanteils, welcher für den Betrieb des Trockners in der Produktionsphase aufzuwenden ist.

An dieser Stelle soll zunächst auf die besondere Form der thermischen Energieversorgung des Trockners bei der *Jungfer Druckerei und Verlag GmbH* eingegangen werden.

Ein großer Anteil der benötigten Energie wird in der *Jungfer Druckerei und Verlag GmbH* mittels einer erdgasbetriebenen Turbine gewonnen. Die entstehende Verbrennungswärme (Abwärme) wird zur Versorgung eines speziell an die lokalen Gegebenheiten angepassten und modifizierten Heißluft-Trockners genutzt. Standardmäßig bzw. in der Originalkonfiguration werden solche Trockner vollständig mit Erdgas betrieben. In Phasen geringen Wärmebedarfs, wie z. B. bei Wechsel zwischen Druckjobs, Einrichtungs- und Stillstandphasen ist im Trockner eine Pilotflamme aktiv, durch welche stetig geringe Mengen Erdgas verbrannt werden. Der Erdgasverbrauch der Pilotflamme liegt bei zirka einem Kubikmeter pro Stunde. Über den Heizwert von Erdgas von ca. 10 Kilowattstunden pro Kubikmeter ergibt sich ein Energieverbrauch von 10 kWh. Das Aufrechterhalten der Pilotflamme hat rein produktions-

technische und damit verbunden wirtschaftliche Gründe. Durch Aufrechterhalten der Pilotflamme während des Produktionsprozesses kann im Falle eines Ausfalls der zentralen Heißluftversorgung der Trockner ohne zeitaufwändigen Startzyklus (Zündphase) unmittelbar konventionell über Erdgasverbrennung betrieben werden. Auf diese Weise können entstehende Makulaturen und Produktionsausfälle minimiert bzw. verhindert werden.

Für die Produktionsphase muss der Trockner schnell auf die optimale Temperatur aufgeheizt werden. Das Aufheizen des Trockners erfolgt ebenfalls mit Erdgas, wobei der Erdgasverbrauch auf Werte von 50 bis 60 Kubikmeter pro Stunde ansteigt. Dies entspricht einer Energie von 500 bis 600 Kilowattstunden und somit einer Heizleistung von 500 bis 600 kW. Die Heizphase dauert je nach Temperatur des Trockners nur wenige Minuten. Unter standardmäßigen Betriebsbedingungen kann der Erdgasverbrauch nach dem Erreichen der Solltemperatur deutlich gesenkt werden. Typische Leistungswerte während der Produktionsphase liegen für Trockner ohne thermische Nachverbrennung im Bereich von bis zu 500 kW. Modernere Trockner mit integrierter thermischer Nachverbrennung verbrauchen im Produktionsbetrieb zwischen 100 und 250 kW thermische Leistung. Die angegebenen Größenordnungen sind typische Leistungswerte, welche zusätzlich vom Druckverfahren, der Farbbelegung der Druckprodukte, der Papierbahnbreite, der Maschinengeschwindigkeit usw. abhängen.

Bei der *Jungfer Druckerei und Verlag GmbH* erfolgt nach dem Aufheizen des Trockners eine Umschaltung der Energieversorgung. Der zum Trocknungsprozess benötigte Heißluftvolumenstrom wird durch Nutzung der Abwärme einer zur Energieversorgung des gesamten Betriebs eingesetzten Erdgasturbine realisiert. Die Abwärme der Turbine ist dabei ausreichend groß, um die Trockner mehrerer Maschinen zu versorgen. Der „real“ zum Betrieb des Trockners während der Produktionsphase aufzuwendende thermische Energiebedarf liegt lediglich in der Aufrechterhaltung der Pilotflamme.

Zunächst soll nochmals die Gesamtleistungscharakteristik des Trockners über der Zeit betrachtet werden, Abbildung 45. Aufgrund der besonderen Betriebsweise des Trockners bei der *Jungfer Druckerei und Verlag GmbH*, die thermische Energieversorgung des Trockners je nach Maschinengeschwindigkeit/Trocknertemperatur „umschalten“ zu können, sind in beiden folgenden Diagrammen mehrere Konfigurationen dargestellt.

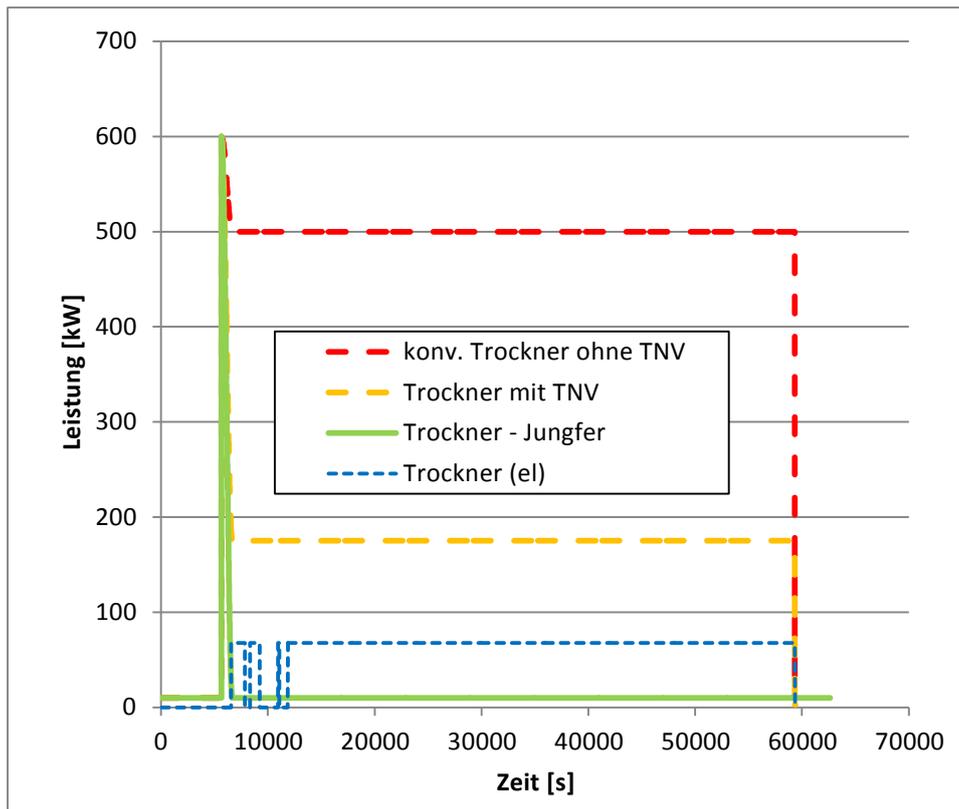


Abbildung 45: Leistungscharakteristik unterschiedlicher Trocknerkonfigurationen, Jungfer Druckerei und Verlag GmbH.

Die erste Trocknerkonfiguration entspricht der konventionellen Betriebsart, wobei die thermische Leistungs- und Energieversorgung alleine durch die Verbrennung von Erdgas realisiert wird. Der zugehörige thermische Energieverbrauch liegt anschließend während der gesamten Produktionsphase bei ca. 500 kWh, was einer dauerhaft wirkenden Heizleistung von 500 kW entspricht (rot gestrichelte Linie). In der heutigen Zeit und in Anbetracht der hohen Energiekosten werden solche Trockner nur noch in Ausnahmefällen betrieben. Neuere Entwicklungen bzw. Erweiterungen von Trocknern weisen eine sogenannte integrierte thermische Nachverbrennung (TNV) auf. Hierbei werden die in den Druckfarben enthaltenen Öle und brennbaren Stoffe, welche beim Trocknungsvorgang freigesetzt werden, separiert, zurückgeführt und in einem zusätzlichen Verbrennungsprozess verbrannt. Mit einer integrierten TNV können enorme Energieeinsparungen realisiert werden. Die weiterhin mittels Erdgas zur Verfügung zu stellenden thermische Leistung für den Trockner liegen nun im Bereich von ca. 175 kW (gelb gestrichelte Linie). Dieser Leistungswert resultiert aus dem Mittelwert der beiden zuvor genannten Heizleistungen moderner Trockner mit integrierter TNV zwischen 100 und 250 kW. Durch die integrierte TNV lassen sich während der Produktion Einsparungen von Heizenergie im Bereich von ca. 65 % erreichen. In der Literatur wird für einen ähnlichen Trocknertyp mit Energierückgewinnungssystem ein Energieverbrauch während der Produktion von ca. 180 kW angegeben, [8].

In der *Jungfer*-Konfiguration kann der thermische Energiebedarf des Trockners durch Nutzung der Abwärme einer Gasturbine fast auf null reduziert werden. Es müssen lediglich dau-

erhaft ca. 10 kW Heizleistung zur Aufrechterhaltung der Pilotflamme aufgewendet werden (grüne Linie).

Zusätzlich ist der elektrische Verbrauch des Trockners eingezeichnet, welcher für den Betrieb der Gebläsemotoren erforderlich ist. Der unregelmäßige Energieverbrauch während dem Einrichtungsbetrieb resultiert aus dem Zu- bzw. Abschalten der Lüfter, welche wiederum von der augenblicklichen Produktionsgeschwindigkeit abhängig ist. Während der Produktionsphase stellt der Trockner einen Konstant-Verbraucher dar, welcher einen mittleren Energiebedarf von ca. 68 kW aufweist.

Die Gesamtleistung des Trockners setzt sich in allen Fällen also aus der – je nach Konfiguration – thermischen Leistung und der jeweils benötigten elektrischen Leistungen zusammen. Für die *Jungfer*-Konfiguration ergibt sich während der Produktionsphase eine Gesamtleistung des Trockners von ca. 78 Kilowatt.

Die drei beschriebenen Trocknerkonfigurationen führen schließlich zu den in Abbildung 46 dargestellten Gesamtleistungscharakteristik der gesamten *LITHOMAN IV 48S* Druckmaschine.

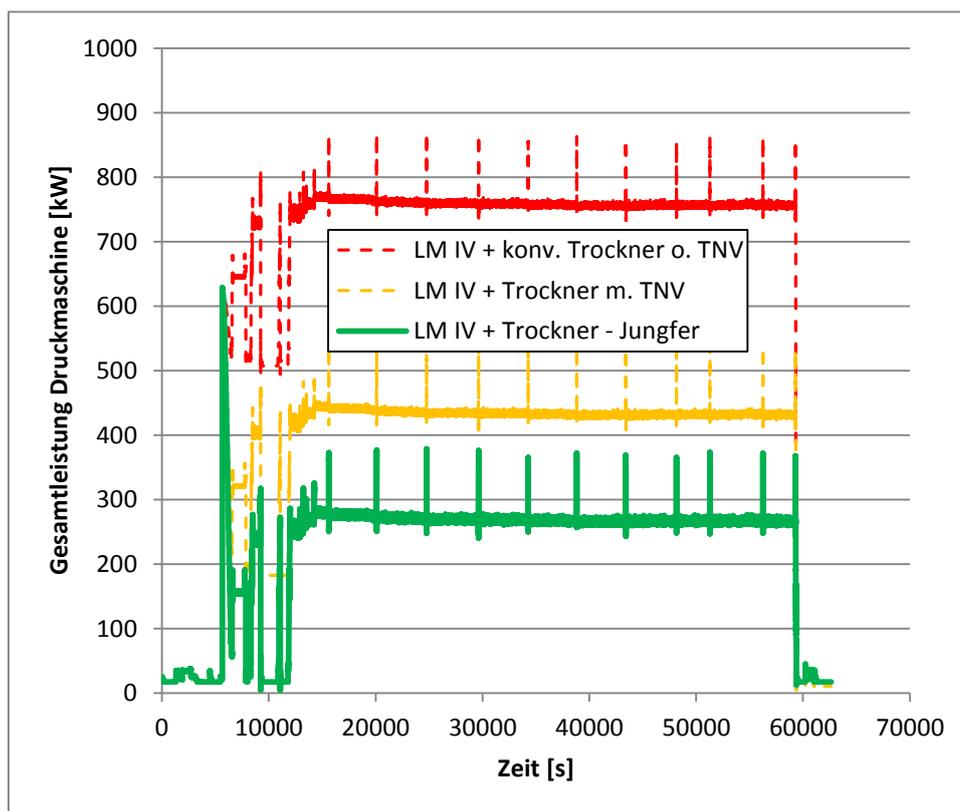


Abbildung 46: Gesamtleistungsverlauf der *LITHOMAN IV 48S* bei unterschiedlichen Trocknerkonfigurationen, *Jungfer Druckerei und Verlag GmbH*.

Der elektrische Leistungsverlauf der *LITHOMAN IV* während einer Produktionsphase wurde bereits in Abbildung 39 dargestellt und erläutert. Ergänzt um die thermischen Leistungsanteile

le, welche zum Betrieb des Trockners benötigt werden, sind drei Gesamtleistungskurven ersichtlich. Bis zum eigentlichen Produktionsbeginn (*Phase II / Phase III*) weisen alle drei Konfigurationen identische Leistungsverläufe auf. Die Leistungsaufnahme steigt mit dem Aufheizen des Trockners stark an. Nach dem Erreichen der Trockner-Solltemperatur und der erfolgten Freigabe der Produktion zeigen sich über den mehrstündigen Produktionszeitraum in guter Näherung konstante Gesamtleistungsverläufe, welche jeweils durch die kurzzeitigen Belastungsspitzen in Höhe von ca. 85 kW unterbrochen werden, welche aus den in den Druckwerken durchgeführten Waschvorgängen resultieren.

Würde die *LITHOMAN IV* mit einem konventionellen Trockner ohne TNV betrieben, so würde während der Produktionsphase eine mittlere Gesamtleistung im Bereich von ca. 760 kW resultieren. Durch die Verwendung von technisch weiterentwickelten Trocknern mit integrierter thermischer Nachverbrennung oder Energierückgewinnungssystemen würde sich die mittlere Leistungsaufnahme auf ca. 435 kW reduzieren, im Vergleich zum konventionellen Betrieb des Trockners eine Einsparung von ca. 43 %.

Bei der *Jungfer*-Konfiguration, in welcher die für den Trockner benötigte thermische Energie durch Nutzung der Abwärme einer Gasturbine gewonnen wird, muss während der Produktion lediglich eine geringe Menge Erdgas zur Aufrechterhaltung der Pilotflamme verbrannt werden. Das verbrannte Erdgas entspricht umgerechnet einer Leistung von 10 kW. Für die gesamte Druckmaschine *LITHOMAN IV* der *Jungfer Druckerei und Verlag GmbH* ergibt sich ein mittlerer Energieverbrauch während der Produktionsphase von ca. 270 Kilowatt. Durch die von *Jungfer* umgesetzte maximiert energieeffiziente Betriebsweise des Trockners, lassen sich im Vergleich zum Betrieb von Trocknern mit integrierten thermischen Nachverbrennern Leistungsreduzierungen in Höhe von ca. 165 kW oder umgerechnet 38 % erzielen. Unter der Annahme, dass der mittlere Vollast-Anteil der Druckmaschinen im Bereich von ca. 75 % liegt, ergibt sich mit der Leistungsdifferenz der Trockner von 165 kW, bei einem 24/7 Mehrschichtbetrieb eine Energieeinsparung von 1.080.000 kWh. Bei Strompreisen für Industriebetriebe in Höhe von etwa 10 Cent pro Kilowattstunde entspricht dies einer Einsparung von ca. 108.000 Euro. Dieser Wert gilt für eine Druckmaschine.

Die Konfiguration im Betrieb des Trockners hat maßgeblichen Einfluss auf die Energieverteilung der Verbrauchergruppen. In der Druckindustrie finden heutzutage fast ausschließlich Trockner mit integrierter thermischer Nachverbrennung bzw. Energierückgewinnungssystemen Anwendung. Ohne TNV würden als Anhaltspunkt ca. 75 % der gesamten benötigten Energie durch den Trockner verbraucht. Für den Betrieb von Trocknern mit TNV sowie die *Jungfer*-Konfiguration ist die Energieverteilung in Abbildung 47 dargestellt.

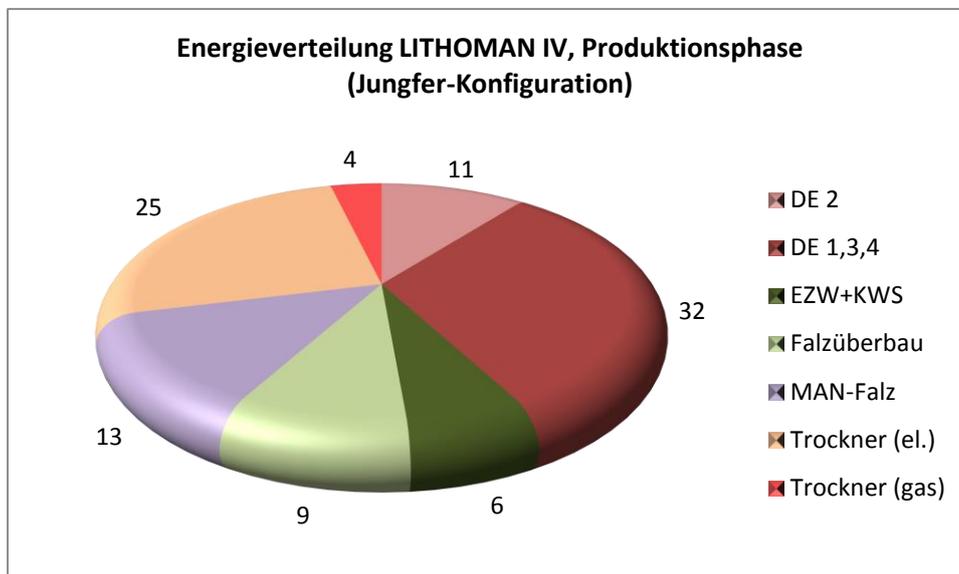
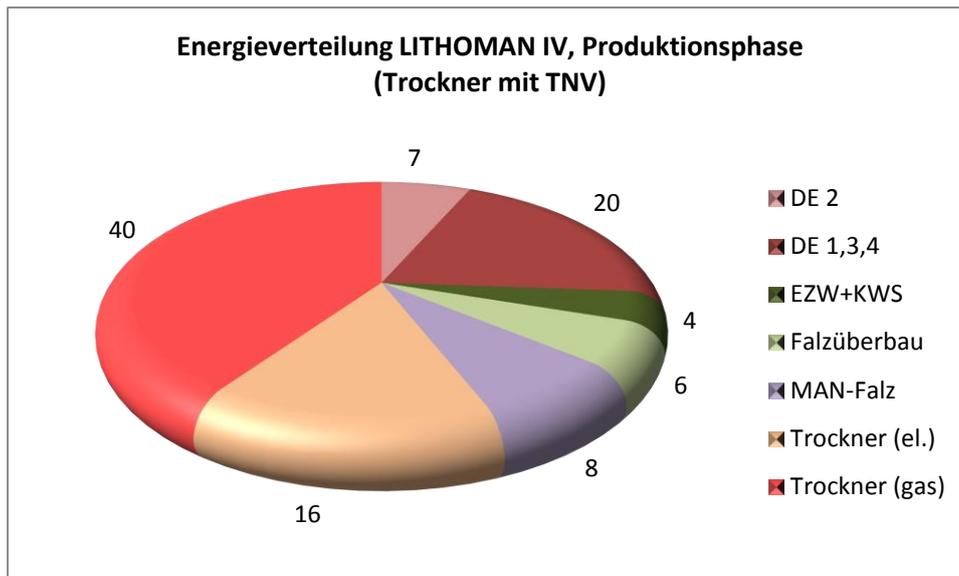


Abbildung 47: Energieverteilung während der Produktionsphase, LITHOMAN IV, Junger Verlag und Druckerei GmbH. Gegenüberstellung Trockner mit TNV – Jungfer-Konfiguration.

In der Druckindustrie werden zumeist Trockner mit integrierter thermischer Nachverbrennung oder vergleichbarer Energierückgewinnungssysteme eingesetzt. Bei derartiger Betriebsweise des Trockners würden ca. 56 % der Gesamtenergie durch den Trockner verbraucht, wovon 16 % der Gesamtenergie auf den elektrischen Antrieb der Gebläsemotoren entfielen. Fast 40 % der Gesamtenergie würde im Trockner durch Verbrennung von Erdgas verbraucht. Der Gesamtverbrauch der Druckwerke läge in diesem Fall bei ca. 27 %. Von den verbleibenden 17 % würden 8 % der Gesamtenergie zum Betrieb des Falzapparates aufzuwenden sein, 6 % auf den Falzüberbau und die restlichen 4 % entfielen auf das Einzugswerk und den Kühlwalzenständer.

In der bei *Jungfer* umgesetzten Energieversorgung des Trockners sind 25 % der Gesamtenergie zum Betrieb der Gebläsemotoren notwendig. Lediglich 4 % der Gesamtenergie muss für die Aufrechterhaltung der Pilotflamme durch Verbrennen von Erdgas aufgewendet werden. Die vier Druckeinheiten verbrauchen ca. 43 % der Gesamtenergie. Der Energieanteil des großen Falzapparates liegt bei 13 % der Gesamtenergie, die restlichen 9 % entfallen auf den Falzüberbau. Der summierte Energieanteil für Einzugwerk und Kühlwalzenständer beträgt 6 %.

Ein interessanter Aspekt ist die Beantwortung der Fragestellung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse von der Druckmaschine im Labormaßstab *LaborMAN II* und der realen Produktionsmaschine *LITHOMAN IV*. Hierzu sollen die Ergebnisse beider Druckmaschinen unter möglichst „vergleichbaren“ Bedingungen bei „*Druck an*“ gegenübergestellt werden.

Die Energieverteilung in der *LaborMAN II* ohne Trockner wurde bereits in Abbildung 37 dargestellt. Bei maximaler Maschinengeschwindigkeit von 3 m/s verbrauchen die beiden Druckwerke zusammen ca. 58 % der Gesamtenergie, wovon ca. 35 % der Gesamtenergie auf das Flexodruckwerk und 23 % auf das Tiefdruck-Druckwerk entfallen. Zum Betrieb der 24-Volt-Elemente waren 17 % der Gesamtenergie aufzuwenden. Die Wickler und Zugwerke verbrauchen zusammen weitere 19 % der Gesamtenergie. Bahnkantensteuerung und sonstige Verbraucher liegen bei je ca. 3 % des Gesamtenergieverbrauchs.

Unter der Annahme, dass der Trockner der *LaborMAN II* – ähnlich zur realen Produktionsmaschine *LITHOMAN IV* – ebenfalls einen Verbrauchsanteil von etwa 56 % der Gesamtenergie aufweist, würde zu der in Abbildung 48 dargestellten Energieverteilung führen.

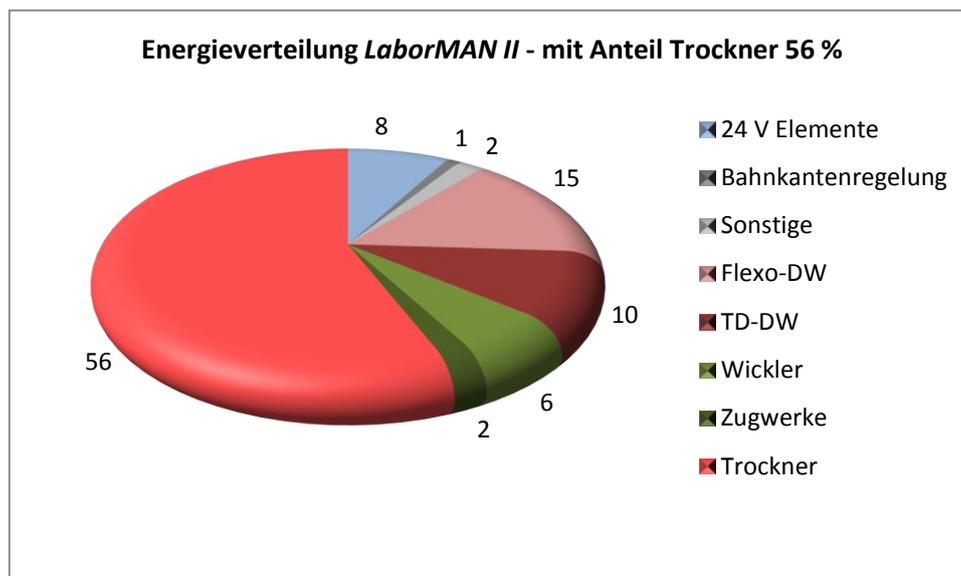


Abbildung 48: Energieverteilung bei Labordruckmaschine *LaborMAN II* mit Berücksichtigung des Trockners (56% Anteil am Gesamtenergieverbrauch).

Bei unveränderter Restkonfiguration der *LaborMAN II* würde für diesen Fall der Verbrauch der beiden Druckwerke bei ca. 25 % der Gesamtenergie liegen.

Dieser Anteil liegt in guter Übereinstimmung zum gemessenen prozentualen Energieverbrauch der Druckwerke während der Produktion an der realen Produktionsmaschine *LITHO-MAN IV für die Konfiguration mit einem Trockner mit TNV*, vergleiche Abbildung 47.

Weitere Vergleichbarkeiten zwischen Labor- und Produktionsmaschine bzw. die Ableitung zusätzlicher Abhängigkeiten sind aus den gezeigten Energieverteilungen nicht direkt ableitbar. Zur Bewertung möglicher skalierbarer Effekte ist an beiden Maschinen eine Ausweitung der experimentellen Untersuchungen notwendig. Detaillierte Untersuchungen unter Beteiligung von Druckmedien, wie z.B. Farbe, Feuchtmittel, Gummitücher usw. sind für den zweiten Teil des Projektes geplant.

3 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Im Rahmen des Projektes „SEMPress – Smart Energy Monitoring für Druckmaschinen“, gefördert von der *Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU*, Az 32902, wurde der Energieverbrauch von Druckmaschinen mittels einer geeigneten Messinfrastruktur auf Steuerungsebene gemessen und analysiert. Die Implementierung der Messinfrastruktur erfolgte zunächst in einer Druckmaschine im Labormaßstab *LaborMAN II* an der Professur Printmedientechnik der Technischen Universität Chemnitz. Zur Verifikation der Ergebnisse wurde die Messtechnik anschließend in eine Rollenoffsetdruckmaschine *LITHOMAN IV 48S*, bei der *Jungfer Druckerei und Verlag GmbH* in Herzberg am Harz transferiert.

Vom Projektpartner *Bosch Rexroth* wurde für das Projekt ein Data Analysis Server (*DAS*) als zentrales Speicher- und Verwaltungsorgan für die Energiemessungen zur Verfügung gestellt.

Zu Beginn des Projekts wurde ein energetisches Modell für Druckmaschinen entwickelt. Dieses Modell setzt sich aus einem Grundmodell und zwei Erweiterungen zusammen. Im Grundmodell wird die energetische Abhängigkeit der einzelnen Verbrauchergruppen in unterschiedlichen Maschinenzuständen dargestellt. Diese Beziehungen konnten mit der Grundversuchsreihe verifiziert werden. Als Grundversuch wurde ein Setup definiert, welches drucktypische Maschineneinstellungen an verschiedenen Arbeitspunkten mittels Variation der Geschwindigkeit durchläuft. Die Erweiterungen des Grundmodells beinhalten einerseits den Einfluss der Prozessparameter und andererseits den Einfluss der Materialparameter auf den Energieverbrauch der Druckmaschine. In dieser Projektphase lag der Schwerpunkt auf den Prozessparametern, wie Maschinengeschwindigkeit, Bahnführung, Bahnzugkräfte, Variation der Zylinderdurchmesser und der Kraft bei Zylinderzustellung.

Zur Vergleichbarkeit der Versuche und Versuchsergebnisse miteinander wurde ein stufenartiges Geschwindigkeitsprofil durchfahren.

Die Labordruckmaschine *LaborMAN II* weist mit zunehmender Maschinengeschwindigkeit einen linear ansteigenden Wirkleistungsverlauf auf. Die Hauptverbraucher bei Druckgeschwindigkeit, Bahnlauf und „*Druck an*“ für beide Druckwerke sind dabei die Druckwerkantriebe des auf Flexo umgebauten Offsetdruckwerk sowie des Tiefdruckwerks mit einem Anteil an der Gesamtleistung von knapp 60 %. Fast 20 % der Gesamtenergie werden für die Wickler und Zugwerke benötigt, die 24-Volt-Elemente verbrauchen ca. 17 % der Gesamtenergie.

Aus den unterschiedlichen Versuchskonfigurationen wurden energetisch die Einflüsse der Pressung im Papierspalt des Tiefdruckwerks und des Papiertransports auf die Wirkleistungsaufnahme berechnet. Erwartungsgemäß steigt der Leistungsbedarf mit zunehmendem Druck und mit zunehmender Geschwindigkeit an. Der Leistungsbedarf der Labordruckmaschine durch Bahnlaufs und „*Druck ab*“ in beiden Druckwerken ist über dem gesamten untersuchten Geschwindigkeitsbereich konstant, bei „*Druck an*“ im Tiefdruckwerk steigt die Leistungsanforderung mit zunehmender Geschwindigkeit linear an.

Beim Flexodruckwerk, bestehend aus drei angetriebenen Zylindern, wurden die Betriebsmodi „*Druck an, einseitig*“ als auch beidseitige Pressung („*Druck an*“) untersucht. Der Leistungsbedarf für „*Druck an*“ ist größer als bei einseitiger Pressung. Beide Einflüsse steigen jeweils mit zunehmender Maschinengeschwindigkeit linear an, wobei der Verlauf mit beidseitiger Pressung eine größere Steigung aufweist als unter einseitiger Pressung.

Mittels Konstant-Geschwindigkeits-Versuchen wurde der Einfluss der Bahnzugkräfte auf den Leistungs- und Energieverbrauch untersucht. Für beide Betriebsmodi der Druckwerke „*Druck an*“ und „*Druck ab*“ ist der Einfluss der Bahnzugkraft auf den Leistungsbedarf im untersuchten Bereich sehr gering. Aus den Leistungsverläufen über der Zeit wurde - analog zu den Versuchen mit stufenartig gefahrenem Geschwindigkeitsprofil bei „*Druck ab*“ - parabelförmig ausgeprägte Wirkleistungsverläufe erkannt. Der Leistungsbedarf war dabei jeweils in der Anfangs- und Endphase größer im Vergleich zur Versuchsmitte. Die analytische Betrachtung zeigte, dass dieser Effekt massenträgheitsbedingt durch die Größeneffekte der Wickler in Verbindung mit der Maschinenregelung verursacht wird. Die summierte Regelleistung ist dabei umso größer, je stärker die Durchmesser von Auf- und Abwickler voneinander abweichen.

Der Vergleich der Versuchsergebnisse mit konstanter Bahnlaufgeschwindigkeit mit Ergebnissen aus den Versuchen mit stufenartigem Geschwindigkeitsprofil zeigte, dass bei „vergleichbaren Konfigurationen unter „*Druck an*““ größere Unterschiede in der Leistungsaufnahme der Labordruckmaschine gemessen wurden. Die Ursache hierzu wurde in der nicht vollständig reproduzierbaren Einstellung der Zylinderzustellungen des Flexodruckwerks erkannt.

Bei Variation des Bahnlaufs in Form von zusätzlich in den Bahnlauf integrierten Papierleitwalzen konnte gezeigt werden, dass die Leistungsaufnahme der Labordruckmaschine mit zunehmender Anzahl umschlungener Leitwalzen zunimmt. Die zusätzliche Energie ist zur Überwindung der Wälzlagereibung der Papierleitwalzen notwendig.

Die Platten- und Gummituchzylinder der *LITHOMAN IV* laufen auf Schmitzringen ab, d. h. der Walzenabstand bei „*Druck an*“ ist mechanisch vorgegeben. Die Pressung im Druckspalt definiert sich durch den Überstand, nämlich dem Maß mit dem das Gummituch über den Schmitzringen vorsteht. Aus der Praxis ist bekannt, dass die Auswahl des Gummituchtyps aufgrund unterschiedlicher Walkarbeit erheblichen Einfluss auf die Leistungsaufnahme einer Maschine hat. Um den Einfluss der Walkarbeit zu untersuchen, wurden an der *LaborMAN II* Zylinder mit unterschiedlichen Hart/Weich-Belägen, die aufeinander ablaufen, untersucht. In dieser Versuchsreihe wurde durch einen Durchmesserfehler eines Zylinders besonders deutlich, wie wichtig exakte Abwickelverhältnisse sind. Ein Durchmesserfehler von 110 µm führte zu einer immensen Veränderung der Leistungsaufnahme der *LaborMAN II*, wobei maximale Leistungsunterschiede um bis zu Faktor 10 gemessen wurden.

Das in der *LaborMAN II* eingebaute Messequipment wurde deinstalliert und in der Produktionsmaschine *LITHOMAN IV* implementiert. Die Analyse einer vollständigen Produktion über insgesamt ca. 16 Stunden ergab, dass zum Betrieb der insgesamt vier Druckeinheiten ca.

43 % der Gesamtenergie aufzuwenden sind. Für den Betrieb des Trockners sind in Summe 29 % der Gesamtenergie erforderlich, wovon 25 % in elektrischer Form zum Antrieb der Gebläsemotoren benötigt werden und 4 % in Form von thermischer Energie zur Aufrechterhaltung der Pilotflamme. Auf den Falzüberbau entfallen 9 % der Gesamtenergie. Der anschließend angeordnete große MAN-Falz verbraucht 13 % der Gesamtenergie. Die verbleibenden 6 % der Gesamtenergie sind zum Betrieb von Einzugwerk und Kühlwalzenständer erforderlich. Der durchschnittliche elektrische Energieverbrauch der *LITHOMAN IV* während der Produktionsphase lag bei ca. 260 kW. Zum Vergleich: Der Verbrauch der Labordruckmaschine bei „*Druck an*“ liegt knapp über 2 kW.

Eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse beider Maschinen ist aufgrund der unterschiedlichen beteiligten Medien bzw. Verbraucher nur bedingt durchführbar. Bei den durchgeführten Versuchen in der *LaborMAN II* wurde der reine Bahnlauf ohne Farbauftrag und ohne Trockner betrachtet. In dieser „*vereinfachten*“ Konfiguration konnten drucktechnisch relevante Parameter variiert und deren Einfluss auf die Leistungs- bzw. Energieaufnahme analysiert werden. Entgegen dem Druckprozess im Labormaßstab sind bei der Produktionsmaschine die am Druck beteiligten Leistungen für Medien wie z. B. Farbe und die Energieanteile des Trockners enthalten. Aufgrund der begrenzten Anzahl vorhandener Rogowski-Spulen konnten in der *LITHOMAN IV* lediglich 5 Messstellen zur Leistungs- und Energieaufzeichnung realisiert werden. Für detailliertere Analyse müsste die eingesetzte Energiemess-technik Spulen um ein Vielfaches erweitert werden.

Um Erkenntnisse hinsichtlich der Skalierbarkeit von Ergebnissen im Labormaßstab auf die Produktionsmaschine gewinnen zu können, ist eine Ausweitung der experimentellen Untersuchungen an beiden Druckmaschinen erforderlich. Demnach müssen Versuche an der Labordruckmaschine unter Berücksichtigung druckrelevanter Medien und aller am Druck beteiligten Verbrauchergruppen durchgeführt werden. An der Produktionsmaschine sind Untersuchungen unter aktiver Variation energetisch relevanter Prozessparameter und Druckmedien erforderlich. Dabei ist zu beachten, dass wissenschaftlich interessante Grenzzustände nicht für alle Prozessparameter erreichbar sind. Aus wirtschaftlichen Gründen des Maschinenbetreibers darf durch experimentelle Versuche keine Makulatur entstehen oder die Produktion beeinträchtigt werden. Diese zusätzlichen Erkenntnisse und Ergebnisse sind unabdingbar, um die energetischen Zusammenhänge in Druckmaschinen wissenschaftlich ausreichend genau analysieren und beschreiben zu können.

Das SEMpress Projekt war ursprünglich als Dreijahres-Projekt geplant. Von Seiten der *Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)* wurde vorgeschlagen, das Projekt in zwei separate Teilprojekte zu unterteilen. Der vorliegende Bericht beschreibt die Ergebnisse der ersten Projektphase. Es wird angestrebt, die zweite Projektphase nach Beendigung der ersten Projektphase zu beantragen. Darin sollen Untersuchungen mit Materialparametern durchgeführt werden, wie z. B. Farben, Gummitücher usw., um somit die zweite Erweiterung des Maschinenmodells zu bearbeiten.

4 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Klimaschutzplan 2050: www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/J-L/klimaschutzplan-2050.pdf. Letzter Zugriff: Februar 2017

- [2] Energieeffizienz-Berater-Netzwerk: www.energieeffizienz-im-betrieb.net/energiekosten-unternehmen/energiesparen-druckerei.html. Letzter Zugriff: Februar 2017

- [3] Wells, N.: Energieeffizienz – Optimierungsmöglichkeiten für Rollenoffset-Druckereien. Webline Special Report No4, PrintCity GmbH + Co. KG, Paris. 2008

- [4] VDMA 66412-4: Manufacturing Execution Systems (MES) - Kennzahlen für Energiemanagement. VDMA-Einheitsblatt, 2014.

- [5] Kraushaar, A.; Ondrusch, M.: Energetische Analyse von Druckprozessen. Fogra-Publikation 67.011. 2014.

- [6] Keller, F.; Klimm, B.; Osterfeld, H.: MES-Kennzahlen, Erweiterung des OEE um den Faktor Energie. Zwischenbericht FOREnergy, München, 2014.

- [7] Eberspächer, P.; Verl, A.; Bruns, A.; Neumann, M.; Constantinescu, C.: Energiedatensimulation. Handbuch für Ressourcenorientierte Produktion, S. 251-267, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2013.

- [8] Webline: Tune-Up – Nachrüsten zur Steigerung der Druckleistung. Webline Cross-Industry News, Ausgabe 14, PrintCity GmbH + Co. KG, Paris. 2012