

---

## **Umsetzung eines mitwachsenden Werkstättengebäudes für eine Werkstätte für behinderte Menschen in Holzbauweise mit optimierter Energieeffizienz und Energiemonitoring**


Abschlussbericht gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung  
Umwelt

AZ 29965/02

Bearbeiter

Prof. DI Hermann Kaufmann, Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH  
M.Eng.Dipl.-Ing.(FH) Florian Hausladen, Hausladen Ingenieurbüro GmbH  
M.Sc. Martin Veit, Veit Energie Consult GmbH  
Prof. Dipl.-Ing.(FH) Mathias Wambsganß, 3lpi lichtplaner + beratende Ingenieure  
M.Sc. Johannes Zauner, 3lpi lichtplaner + beratende Ingenieure  
Prof. Dr. med. Herbert Plischke, Hochschule München  
Dipl.-Psych. Markus Bund, Hochschule München

Dezember 2016

06/02		<b>Projektkennblatt</b> der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>			
Az	<b>29965/02</b>	Referat		Fördersumme	<b>€ 407.118,10</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Umsetzung eines mitwachsenden Werkstättengebäudes für eine Werkstätte für behinderte Menschen in Holzbauweise mit optimierter Energieeffizienz und Energiemonitoring</b>			
<b>Stichworte</b>					
	Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
	<b>2 Jahre und 11 Monate</b>	<b>2/2013</b>	<b>12/2016</b>		
	Zwischenberichte	nach 8 Monaten			
<b>Bewilligungsempfänger</b>	ISAR-WÜRM-LECH IWL - Werkstätten für behinderte Menschen gemeinnützige GmbH Rudolf-Diesel-Str. 1-3 86899 Landsberg am Lech			Tel 08191/92 41 - 825	
				Fax 08191/92 41 - 818	
				Projektleitung Herr Ludger Escher	
				Bearbeiter Frau Regula Wolf	
<b>Kooperationspartner</b>	Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH Sportplatzweg 5, A-6858 Schwarzach				
	Veit Energie Consult GmbH, Energie- und Gebäudemanagement Röhrenwiesen 26, D-94051 Hauzenberg				
	3lpi lichtplaner + beratende ingenieure mbh Aidenbachstr. 52a, D-81379 München				
<b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b>					
Die ISAR-WÜRM-LECH IWL Werkstätten (kurz: IWL gGmbH) ist eine gemeinnützige Einrichtung der beruflichen Rehabilitation für Menschen mit Behinderung.					
Die IWL gGmbH baut den Produktionsstandort in Landsberg am Lech aus und mittelfristig soll der gesamte Betrieb, welcher für die Qualifizierung von psychisch erkrankten Menschen zuständig ist, auf dem eigenen Grundstück angesiedelt werden.					
Die Planung für das dafür notwendige neue Produktionsgebäude hat das Architekturbüro Kaufmann, durch Gewinn des dafür ausgelobten Wettbewerbes, übernommen.					
Das Projekt entspricht sehr hohen ökologischen Ansprüchen. So wird das gesamte Bauvorhaben möglichst mit nachwachsenden Rohstoffen ausgeführt.					

Auch wurde im interdisziplinären Planungsprozess ein auf das Projekt abgestimmter optimierter Energiestandard entwickelt.

Beim Bauvorhaben handelt es sich um einen Gewerbebetrieb mit der typischen Dynamik eines solchen Gebäudes.

Die Erarbeitung der Endausbausituation als Aufgabenstellung im Wettbewerb ermöglichte die Festlegung der Bauteile, welche so konstruiert werden müssen, dass sie zerstörungsfrei auch für eine Erweiterung wieder verwendet werden können. Diese wurden zusammen mit einem Holzbaubetrieb im Detail entwickelt und ausgeschrieben.

Die Arbeitsplatzqualität ist gerade für behinderte Mitbürger entscheidend für deren Leistungsfähigkeit. So wird Wert auf hohe architektonische, akustische und thermische Qualität gelegt, ebenso auf eine optimale natürliche Belichtung der Arbeitsplätze. Entscheidend ist auch die Qualität der künstlichen Beleuchtung. Im Rahmen des Projektes soll die Wirkung von Kunstlicht im industriellen Bereich untersucht werden. Relevant ist hierbei insbesondere die Frage, ob durch wechselnden Lichtsequenzen das Wohlbefinden von Mitarbeitern und damit einhergehend die Leistungsfähigkeit gesteigert werden kann.

Es sollen die erarbeiteten Ergebnisse, das Projekt sowie die neuen Erkenntnisse nach Fertigstellung als hochwertige Publikation in Form eines Buches veröffentlicht werden.

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

#### **Versetzbare Fassadenelemente des mitwachsenden Holzbaus**

Das Projekt zeichnet sich durch einen ganzheitlichen Planungsansatz aus, der bereits mehrere mögliche Baustufen in das Gesamtkonzept miteinbezieht. Bereits schon bei der ersten Baustufe wird starkes Augenmerk auf die Eignung der einzelnen Elemente für zu erwartende Veränderung gelegt. Es ist zu erwarten, dass das Wachstum in absehbaren Zeitspannen erfolgen wird und somit ist es sinnvoll, die Bauteile, die flexibel ausgeführt werden müssen, so zu konzipieren, dass sie möglichst zerstörungsfrei in ihre neuen Lagen versetzt werden können. Das gilt für Außenwände, die bei einer Erweiterung der Werkstätten wiederverwendet werden sollten. In der ersten Planungsstufe wurden diese auf Grundlage des Endausbaukonzeptes bestimmt und für diese prototypischen Detaillösungen, die eine zerstörungsfreie Demontage von Außen- und Innenwandelementen für einen Gewerbebau ermöglichen, entwickelt. Die einzelnen Elemente wurden so konzipiert, dass sie auch beweglich bleiben, das heißt mit vertretbarem Aufwand in ihre neue Lage versetzt werden können.

Die in der Planungsphase integral erarbeiteten Detaillösungen werden mit der ausführenden Firma in einem ersten Schritt auf ihre Tauglichkeit der Umsetzbarkeit überprüft. Details werden schon in der Werkplanung auf Grund von produktions- und montagetechischen Anforderungen angepasst und überarbeitet. Die daraus resultierenden Erfahrungen sind Teil des Forschungsauftrages und werden dokumentiert. In einem nächsten Schritt werden während der Produktion und der Errichtung des Holzbaus die in der Planung angenommenen Umstände und Abläufe auf deren Richtigkeit untersucht. Diese Beobachtung der Detaillösungen wird bis ca. 24 Monate nach der Fertigstellung des Gebäudes weitergeführt, um eventuelle Wechselwirkungen der unterschiedlichen Bauteile bzw. deren Resistenz gegen äußere Einflüsse protokollieren zu können.

### **Tages- und Kunstlichtkonzept**

Auf Basis der bereits vorliegenden Planung und der daraus resultierenden Tageslichtsituation wird gemeinsam mit den Planungsbeteiligten ein an den Bedürfnissen der MitarbeiterInnen und den Erfordernissen des energiegerechten Bauens ausgerichtetes Tages- und Kunstlichtkonzept erarbeitet. Der Verlauf des Tageslichtquotienten wird im Grundriss für die relevanten Bereiche dargestellt. Daraus wird jeweils auf die Tageslichtautonomie und den Strombedarf für Beleuchtung geschlossen, der dann in die Berechnungen zum erzielbaren Primärenergiebedarf Haustechnik einfließen kann.

Die Nutzer der Arbeitsplätze haben durch ihre individuellen Behinderungen möglicherweise von gängigen Normen und Richtlinien abweichende Bedürfnisse und Anforderungen an die Beleuchtung. In eine Voruntersuchung an den Bestandsarbeitsplätzen werden die Grundlagen für die Auslegung der Neuanlage ermittelt. Neben Gesprächen mit den verantwortlichen Mitarbeitern und Betreuern vor Ort werden dazu auch Messungen der Beleuchtungsstärkeverhältnisse und der Leuchtdichtesituation an ausgewählten Arbeitsplätzen vorgenommen. Diese dienen auch als Grundlage für eine vergleichende Bewertung alt/neu.

Diese Daten dienen auch als numerische Basis einer gesondert durchzuführenden Studie über die Nutzerakzeptanz der kompletten Maßnahme.

### **Energiemanagement und Energiemonitoring**

Nach Abschluss des Projektes sollen mittels Energiemonitoring bzw. Energiemanagement die organisatorischen und technischen Abläufe sowie Verhaltensweisen im Rahmen eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses den betrieblichen Gesamtenergieverbrauch (also auch die für die Produktion erforderliche Energie) und den Verbrauch von Grund- und Zusatzstoffen deutlich senken. Durch das Monitoringkonzept sollen neben der energetischen Optimierung sowohl der haustechnischen als auch Produktionsanlagen vorrangig die Fragestellung geklärt werden, welche grafisch-visuellen Schnittstellen zwischen Mensch und Maschinen in verschiedenen Produktionsumgebungen (Metall, Holzverarbeitung, Lackiererei, Lager usw.) für einzelnen Nutzer im Produktions- und Arbeitsumfeld am geeignetsten sind, um aktiv die Energieverbräuche in seiner Umgebung dauerhaft positiv zu beeinflussen.

Das vorgesehene energetische Monitoring umfasst auch die Beleuchtungsanlage, insbesondere im Hinblick auf die zusätzlichen Anforderungen der biologisch wirksamen Beleuchtungslösung.

### **Ergebnisse**

Der Holzbau eignet sich durch die Möglichkeit einer umfassenden Vorfabrikation im Werk und einem raschen Versetzen auf der Baustelle auch später hervorragend dafür, die Elemente wieder zu demontieren. Nach der Demontage können sie, bei einer entsprechenden Wahl der Verbindungsmittel, ohne größere Beeinträchtigung wieder an neuer Stelle eingebaut werden.

Die in der Elektroplanung definierten Zielsetzungen können großteils mit marktüblichen Produkten realisiert werden. Durch die Kombination von gängigen Produkten können die gewünschten Ergebnisse mit vertretbarem wirtschaftlichem Aufwand realisiert werden. Eine eigens für das Projekt entwickelte Strategie des Lichtmanagements trug dem energetisch und wirtschaftlichen Betrieb ebenso Rechnung wie der biologischen Wirksamkeit. Dies gelang durch die Verknüpfung der Kunstlichtkomponenten mit dem Tageslichtangebot, sinnvoller Zonierung sowie einem tageszeitabhängigen Profil der biologischen Aktivierung.

## Inhalt

Projektkennblatt.....	2
1. Verzeichnis von Bildern Zeichnungen, Grafiken und Tabellen.....	7
2. Zusammenfassung.....	10
3. Einleitung.....	11
4. Hauptteil.....	13
4.1 Förderung der investiven Mehrkosten der versetzbaren Fassadenelemente des mitwachsenden Holzbaus.....	13
4.1.1 Aufgabenstellung.....	13
4.1.2 Zielsetzung.....	13
4.1.3 Ergebnis.....	14
4.2 Kostenermittlung Beleuchtung.....	14
4.2.1 Aufgabenstellung.....	14
4.2.2 Zielsetzung.....	14
4.2.3 Ergebnis.....	15
4.2.4 Ergebnis.....	18
4.3 Kostenermittlung Monitoring.....	18
4.3.1 Aufgabenstellung.....	18
4.3.2 Zielsetzung.....	18
4.3.3 Ergebnis.....	19
4.3.4 Ergebnis.....	21
4.4 Abstimmen, überwachen und dokumentieren der geplanten Ausführungsdetails in der Ausführungsphase.....	23
4.4.1 Aufgabenstellung.....	23
4.4.2 Zielsetzung.....	23
4.4.3 Ergebnis.....	23
4.5 Dokumentation in Buchform.....	30
4.5.1 Aufgabenstellung.....	30
4.5.2 Zielsetzung.....	30
4.5.3 Ergebnis.....	30
4.6 Planung und Umsetzung einer biodynamisch wirksamen Kunstlichtanlage.....	31

---

4.7	Betrieb einer biodynamisch wirksamen Kunstlichtanlage .....	42
4.8	Qualifiziertes Energiemonitoring.....	42
5.	Fazit .....	43
5.1	Förderung der investiven Mehrkosten der versetzbaren Fassadenelemente des mitwachsenden Holzbaus.....	43
5.2	Abstimmen, überwachen und dokumentieren der geplanten Ausführungsdetails in der Ausführungsphase .....	43
5.3	Elektroplanung .....	43
5.4	Planung und Umsetzung einer biodynamisch wirksamen Kunstlichtanlage.....	44
5.5.	Humanbiologische Begleitforschung.....	46
5.5.1.	Ziel der humanbiologischen Begleituntersuchung.....	46
5.5.2.	Untersuchungsdesign .....	46
5.5.3.	Zusammenfassung der Ergebnisse für das erste Untersuchungsjahr .....	47
5.5.4.	Zusammenfassung der Ergebnisse für das zweite Untersuchungsjahr.....	48
5.5.5.	Gesamtbewertung:.....	50
5.6	Betrieb einer biodynamisch wirksamen Kunstlichtanlage .....	51
5.7	Qualifiziertes Energiemonitoring.....	51

## 1. Verzeichnis von Bildern Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

S. 16	Ergebnis Lichtberechnung	Büro 3lpi
S. 16	Blick in die Produktionshalle	Fotoarchiv Büro 3lpi
S. 17	Leuchtdichte – Blick Längs zur Halle	Büro 3lpi
S. 17	Leuchtdichte – Blick quer zur Halle	Büro 3lpi
S. 19	Schema Energiedatenaufnahme	Büro 3lpi
S. 19	Wärmeerbrauch Produktionsanlagen	Büro 3lpi
S. 20	Stromverbrauch Produktionsanlagen	Büro 3lpi
S. 21	Schema Zählermanagementstruktur	Büro 3lpi
S. 24	Detail Pfosten Verglasung Süd	Ausschnitt Ausführungsplanung
S. 24	Skizze Pfosten-Riegel-Fassade Süd	Skizze Fa. Gump & Maier
S. 25	Detail Pfosten-Riegel-Fassade	Werkplanung Fa. Gump & Maier
S. 25	Schnitt Fassade Süden Montagefolge	Ausschnitt Ausführungsplanung
S. 26	ob. Anschluss Pfosten-Riegel Fassade	Ausschnitt Ausführungsplanung
S. 27	Sockelausbildung – Montageabfolge	Ausschnitt Ausführungsplanung
S. 27	Ansicht Südfassade	Ausschnitt Ausführungsplanung
S. 28	Schnitt Westfassade Montagefolge	Ausschnitt Ausführungsplanung
S. 29	Versetzen Holzelemente Südfassade	Fotoarchiv Büro Kaufmann
S. 29	Elementstoß Westfassade	Fotoarchiv Büro Kaufmann
S. 31	Kunstlichtszene Haupthalle	Fotoarchiv Zumtobel
S. 34	Sheddach m. Fensterband Nord	Fotoarchiv Büro 3lpi
S. 35	Auszug von Iterationsschnitten Halle	Büro 3lpi
S. 36	Falschfarbenbilder d. Leuchtendichte	Büro 3lpi
S. 36	Transmissionsunterschiede Gläser	Büro 3lpi
S. 37	Transmissionsgrad Gläser	Büro 3lpi
S. 38	Tageslichtbeleuchtungsstärkeverlauf	Büro 3lpi
S. 39	Spektralverlauf Innenraum	Büro 3lpi

---

S. 39	Systemschnitt Kunstlichtkomponenten	Büro 3lpi
S. 40	Reflexionsdaten von Anstrichen	Büro 3lpi
S. 41	Falschfarbendarstellung Zylindrischer Beleuchtungsstärke	Büro 3lpi
S. 42	Tageszeitabhängige Programmierung der Komponenten	Büro 3lpi
S. 44	Messwerte Beleuchtungsstärken	Büro Veit
S. 45	Kostenvergleich Kunstlichtanlagen	Büro Veit
S. 47	Zeitl. Ablauf Begleituntersuchung	Hochschule München
S. 48	Statistik Wohlbefinden - Sommer	Hochschule München
S. 48	Statistik Wohlbefinden – Winter	Hochschule München
S. 50	Gesamtbewertung Wohlbefinden	Hochschule München

#### Anlagen

- Tischvorlage 1 – Schlussbericht „qualitatives Energiemonitoring“
- Tischvorlage 2 – Plausibilitätsprüfung erster Messdaten
- Tischvorlage 3 – Vergleich Kunstlichtstrombedarf mit gemessenem Verbrauch
- Tischvorlage 4 – Ergebnisse der vergleichenden Lichtmesskampagne
- Tischvorlage 5 – AV1 - qualitatives Energiemonitoring
- Tischvorlage 6 – AV2 - qualitatives Energiemonitoring
- Tischvorlage 7 – AV3 - qualitatives Energiemonitoring
- Tischvorlage 8 – Reporting Juli 2015 – Monitoring Monat 1
- Tischvorlage 9 – Reporting August 2015 – Monitoring Monat 2
- Tischvorlage 10 – Reporting September 2015 – Monitoring Monat 3
- Tischvorlage 11 – Reporting Oktober 2015 – Monitoring Monat 4
- Tischvorlage 12 – Reporting November 2015 – Monitoring Monat 5
- Tischvorlage 13 – Reporting Dezember 2015 – Monitoring Monat 6
- Tischvorlage 14 – Reporting Januar 2016 – Monitoring Monat 7
- Tischvorlage 15 – Reporting Februar 2016 – Monitoring Monat 8
- Tischvorlage 16 – Reporting März 2016 – Monitoring Monat 9
- Tischvorlage 17 – Reporting April 2016 – Monitoring Monat 10



- Tischvorlage 18 – Reporting Mai 2016 – Monitoring Monat 11
- Tischvorlage 19 – Reporting Juni 2016 – Monitoring Monat 12
- Tischvorlage 20 – kontinuierliches Energiemonitoring
- Tischvorlage 21 – Datenblatt Helligkeits- und Temperatursensor
- Tischvorlage 22 – Datenblatt Rogowski Spulen
- Tischvorlage 23 – Datenblatt Stromzähler Schaltschränke
- Tischvorlage 24 – Datenblatt Wärmehähler – Rechenwert T550-UC50
- Tischvorlage 25 – Wärmehähler – T550-UC50 - Bedienungsanleitung

## 2. Zusammenfassung

Bei der Planung und Umsetzung des neuen Werkstättengebäudes für die IWL Landsberg wurde besonderes Augenmerk auf die Entwicklung ressourcenschonender Bauteile und Produkte gelegt. Das heißt, innovative Bauteile, Baustoffe, Konstruktionen sowie technische Gebäudeausrüstungen unter den Kriterien der Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung.

Erreicht wurde dies durch einen interdisziplinären und gesamtheitlichen Planungsansatz. Schon im Vorfeld wurden sämtliche Fachplaner, aber auch zum Teil ausführende Firmen, in den Planungsprozess integriert, um diese hochgesteckten Ziele zu erreichen.

Das Gebäude ist so konzipiert, dass es in zwei Richtungen erweitert werden kann und zwar so, dass die Fassadenelemente möglichst zerstörungsfrei entfernt und wieder als Gebäudehülle verwendet werden können.

Als Baumaterial wurden zum Großteil nachwachsende Materialien verwendet.

Die Holzbauweise bietet eine gute Grundlage zur Erreichung der Ziele eines energieeffizienten Bauens. Diese Idee und die Konstruktion sind auch außen am Gebäude ablesbar – naturbelassenes Holz an der Fassade zeigt diese Grundhaltung in einem sonst eher durch nüchternen Funktionalismus geprägten architektonischen Umfeld.

Folgende Firmen waren an der Planung und Monitoring beteiligt:

Prof. DI Hermann Kaufmann, Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH

M.Eng.Dipl.-Ing.(FH) Florian Hausladen, Hausladen Ingenieurbüro GmbH

Herr M.Sc. Martin Veit, Veit Energie Consult GmbH

Herr Alexander Gumpp, Gumpp & Maier GmbH

Prof. Dipl.-Ing.(FH) Mathias Wambsganß, 3lpi lichtplaner + beratende Ingenieure

M.Sc. Johannes Zauner, 3lpi lichtplaner + beratende Ingenieure

Prof. Dr. med. Herbert Plischke, Hochschule München

Das Projekt wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert Az: 29965/02

### 3. Einleitung

Die ISAR-WÜRM-LECH IWL Werkstätten (kurz: IWL gGmbH) ist eine gemeinnützige Einrichtung der beruflichen Rehabilitation für Menschen mit Behinderung. Sie beschäftigt derzeit 200 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in Landsberg am Lech, München und Machtlfing, sowie Garching und Unterschleißheim. Als mittelständisches Unternehmen erwirtschaftete die IWL gGmbH im Jahr 2010 einen Jahresumsatz von 18,3 Mio. Euro. In Landsberg betreibt die IWL gGmbH zwei Betriebe. Im Betrieb Landsberg am Lech, Rudolf-Diesel-Straße werden Menschen mit geistiger- und/oder Mehrfachbehinderung beschäftigt. Diesen Menschen bietet die IWL gGmbH Teilhabe am Arbeitsleben und berufliche Qualifizierung. Die IWL gGmbH plant, den Produktionsstandort in Landsberg am Lech auszubauen. Zudem soll mittelfristig der Betrieb, welcher für die Qualifizierung von psychisch erkrankten Menschen zuständig ist, auf dem eigenen Grundstück angesiedelt werden. Es ist eine schrittweise Erneuerung und damit einhergehend die Weiterentwicklung der Produktionsstätten auf dem erworbenen und bereits freigeäumten Nachbargrundstück umzusetzen. Die Entwicklung wird sich über mehrere Bauabschnitte erstrecken, somit musste bereits für die erste Planung eine Gesamtkonzeption entwickelt werden. Diese erfolgte in Form eines Wettbewerbes. Aus 5 eingereichten Vorschlägen wurde das Projekt des Büros Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH aus Schwarzach ausgewählt. Das Projekt soll sehr hohen ökologischen Ansprüchen entsprechen.

Bei der jetzt umgesetzten ersten Baustufe handelt es sich um das Werkstättengebäude, das die Tischlerei samt Zentrallager sowie den IWL-Laden inkl. Kommissionierschreinerei aufnimmt, im Obergeschoss sollen teilweise Büroflächen und Montageflächen entstehen. Dieser Bauteil soll modular wachsen können, was durch die vorliegende Planung aus dem Wettbewerb belegt ist.

Das gesamte Bauvorhaben soll möglichst mit nachwachsenden Rohstoffen ausgeführt werden, ebenso soll ein vorbildlicher Energiestandard umgesetzt werden. Das erfordert eine innovative Planung, für die Konzeption dieses flexiblen und mitwachsenden Holzbaus mit optimierter Energieeffizienz sind vernetzte Betrachtungsweisen sowie ein interdisziplinärer und ganzheitlicher Planungsprozess notwendig.

Folgende Zielsetzungen wurden dabei verfolgt:

- die Entwicklung eines optimierten und möglichst hohen Vorfertigungsgrades des Holzbaus
- die Entwicklung vorgefertigter flexibler Elemente für den mitwachsenden Holzbau
- Erarbeitung einer Musterlösung für eine energieverlustarme LKW-Anlieferung
- Optimierung des Projektes in energetischer Hinsicht und Festlegung eines wirtschaftlich darstellbaren Energiestandards
- spezielle thermische Simulation zur Erarbeitung der Kriterien für den optimierten Energiestandard
- Erstellung eines Energieausweises gemäß EnEV 2009
- Wärmebrückenoptimierung

- Untersuchung eines möglichen Synergieeffektes für die Gebäudeheizung über die Sprinkleranlage
- Entwicklung einer Masterplanung der Energieversorgung
- innovative Tageslicht- und anwesenheitsabhängige LED-Beleuchtung in Industrieanlagen
- Energiemonitoring mit visueller Darstellung der Energieströme innerhalb des Gebäudes

Verfolgt und erreicht wurden die Ziele durch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit der einzelnen Fachplaner unter Einbeziehung auch von ausführenden Firmen. Komplexe Bauaufgaben dieser Art verlangen von allen an der Planung und Ausführung Beteiligten eine Zusammenarbeit, die über die Grenzen des eigenen Fachgebietes hinausreicht. Die Verfolgung eines gemeinsamen Zieles, dass durch die Definition ein ressourcenschonendes im weitesten Sinn auch benutzer- und umweltfreundliches Gebäude zu erstellen ist - auch bedingt durch das Bewusstsein für einen speziellen Nutzerkreis tätig zu sein - hat dies hier aber einwandfrei ermöglicht.

## 4. Hauptteil

### 4.1 Förderung der investiven Mehrkosten der versetzbaren Fassadenelemente des mitwachsenden Holzbaus

#### 4.1.1 Aufgabenstellung

Das Projekt zeichnet sich durch einen ganzheitlichen Planungsansatz aus, der bereits mehrere mögliche Baustufen in das Gesamtkonzept miteinbezieht. Bereits schon bei der ersten Baustufe wird starkes Augenmerk auf die Eignung der einzelnen Elemente für zu erwartende Veränderung gelegt. Es ist zu erwarten, dass das Wachstum in absehbaren Zeitspannen erfolgen wird und somit ist es sinnvoll, die Bauteile, die flexibel ausgeführt werden müssen, so zu konzipieren, dass sie möglichst zerstörungsfrei in ihre neuen Lagen versetzt werden können. Das gilt für Außenwände, die bei einer Erweiterung der Werkstätten wiederverwendet werden sollten. In der ersten Planungsstufe wurden diese auf Grundlage des Endausbaukonzeptes bestimmt und für diese prototypischen Detaillösungen, die eine zerstörungsfreie Demontage von Außen- und Innenwandelementen für einen Gewerbebau ermöglichen, entwickelt. Die einzelnen Elemente wurden so konzipiert, dass sie auch beweglich bleiben, das heißt mit vertretbarem Aufwand in ihre neue Lage versetzt werden können. Dabei wurde keine Systemwand entwickelt, wie sie im Bürobau bereits angewendet werden als flexible Bürotrennwände, denn dazu sind die Anforderungen und Funktionalitäten im Gewerbebau zu unterschiedlich. Augenmerk wurde auf prototypischen Detaillösungen gelegt.

#### 4.1.2 Zielsetzung

Die Versetzbarkeit von Fassadenelementen erfordert komplexere Konstruktionsaufbauten um sie transportabel zu halten sowie aufwändigere Anschlussdetails, die ein zerstörungsfreies Demontieren ermöglichen.

Ebenso treten Mehrkosten in den Fundamentbereichen auf, denn auch die Sockelkonstruktionen müssen beweglich gehalten werden um sie wieder zu verwenden und um später aufwändige Rückbaumaßnahmen zu vermeiden.

Ziel soll es sein, die Kosten dieser umgesetzten flexiblen Konstruktionsaufbauten und–anschlüssen mit herkömmlichen Bauweisen und Verbindungsmitteln zu vergleichen.

### 4.1.3 Ergebnis

Gegenüber herkömmlichen Bauweisen und Verbindungsmitteln setzen sich die Mehrkosten für die Herstellung und Montage der flexiblen Fassadenelemente wie folgt zusammen:

Mehrkosten Fundamente:	Fassade Süd	9.225,21 €
	Fassade West:	6.362,21 €
Mehrkosten Fassadenelemente:	Glasfassade Süd:	23.240,70 €
	Holzfassadenelemente Süd:	1.500,00 €
	Vordach Süd:	5.000,00 €
	Holzfassadenelemente West:	3.000,00 €

## 4.2 Kostenermittlung Beleuchtung

### 4.2.1 Aufgabenstellung

Untersuchung und Definition von Beleuchtungsstandart, die den Menschen in einem Produktionsgebäude ein Arbeitsumfeld bietet, das die Konzentrations- und Leistungsfähigkeit erhält/erhöht und den Bedürfnissen der Mitarbeiter dauerhaft entspricht.

### 4.2.2 Zielsetzung

Die ursprüngliche Zielsetzung war die Definition von Beleuchtungsstandards, die den Menschen in der Produktion und Verwaltung ein nach Ihren physischen und psychischen Bedürfnissen optimiertes Arbeitsumfeld bietet.

Hier sollte am Beispiel von 3 Arbeitsplätzen in der Produktion und Verwaltung ein optimaler Beleuchtungsstandard unter Berücksichtigung von Tageslichtnutzung und Kunstlicht in unterschiedlichen Farbspektren (Warm- und Kaltweiß) definiert und bestimmt werden. Die Qualität der Beleuchtungsanlage/ -steuerung sollte anschließend durch Praxistest und Nutzerbefragung evaluiert und optimiert werden.

Im Zeitraum der Ausführungsplanung wurde im Bereich der Beleuchtung ergänzend zu den bestehenden DIN Normen die DIN SPEC 67600 (2013-04) mit konkreten Planungsempfehlungen für circadian wirksame Beleuchtungen veröffentlicht. Daher wurde die ursprüngliche Zielsetzung geändert, um die aktuellen Entwicklungen in diesem Bereich aufzugreifen und weitere Erkenntnisse zu diesem Thema zu gewinnen.

Die neue Zielsetzung lautete daher, Planung und Umsetzung einer circadian wirksamen Kunstlichtanlage, sowie die wissenschaftliche Evaluation deren Wirkungen durch Humanbiologische Begleitforschung. Der Planungs- und Umsetzungsprozess ist in Kapitel 4.6 und die Ergebnisse der wissenschaftlichen Begleitforschung in Kapitel 5.5 zusammengefasst.

Um eine wissenschaftlich fundierte Aussage treffen zu können, wurde die Installation des circadian wirksamen Lichts auf den Produktionsbereich reduziert, hier jedoch nicht auf einzelne Arbeitsplätze beschränkt, sondern auf den gesamten Produktionsbereich ausgeweitet. Dadurch konnte eine möglichst große Gruppe an Menschen in die Begleitforschung einbezogen werden. Hierdurch erhöht sich die statistische Aussagekraft der Ergebnisse der Begleitforschung.

### 4.2.3 Ergebnis

Im Rahmen eines integrierten Planungsansatzes wurde ein Lichtkonzept entwickelt, mit dem die Anforderungen an circadiane Wirksamkeit erfüllt werden können. Die Planungsschritte und Umsetzungen sind im Kapitel 4.6 detailliert beschrieben. Als weitere Folge der Umsetzung einer Lichtanlage mit circadianer Wirksamkeit ergaben sich zusätzliche Anforderungen. Entgegen der ursprünglichen Idee, dass jeder Mitarbeiter die Beleuchtungssituation nach seinen physischen und psychischen Bedürfnissen optimieren kann, ist durch die circadiane Wirksamkeit der Beleuchtung in der gesamten Produktionsfläche eine entgegengesetzte Strategie notwendig. Die Umsetzung einer circadian wirksamen Beleuchtungslösung erfordert hier einen Ansatz, der trotz individueller Unterschiede für alle Nutzer einen positiven Einfluss unter Beachtung der wissenschaftlichen Erkenntnisse verspricht. Daher wurde die Zugriffsmöglichkeit auf die Steuerung auf wenige Personen beschränkt. Dadurch sollen negative Wirkungen vermieden werden, die durch individuelle, unwissende oder zufällige Manipulation der Beleuchtungsparameter entstehen könnten.

Eine circadiane Wirksamkeit der Beleuchtungsanlage ist nicht anhand der menschlichen Hellempfindlichkeit überprüfbar. Daher empfiehlt sich für den Betreiber einer solchen Beleuchtungsanlage als Teil der Abnahme Messungen der spektral aufgelösten Bestrahlungsstärken am Nutzerzugangspunkt durchführen zu lassen. Die Aufwendungen für die Planung und Inbetriebnahme einer circadian wirksamen Beleuchtung sind derzeit noch deutlich höher, da wenige Erfahrungswerte vorliegen. Die Vereinfachung dieser Prozesse kann Thema weiterer Forschungsprojekte sein. Ein Vergleich der Invest- und Verbrauchskosten verschiedener Kunstlichtlösungen wird in Kapitel 5.4 dargestellt.

### Zielstellung Kunstlichtkonzept Halle (LV-Grundlage)

Werte bei 100% Lichtstrom aller Komponenten und Wartungsfaktor 0,67

Beleuchtungsstärke Horizontal H=85cm im Mittel: 821 Lux

Beleuchtungsstärke Vertikal H=150m im Mittel: 270 Lux melanopisch bewertet

Eh und Ev jeweils im Bereich Halle Sheddachversorgt

### Ergebnisse Licht

#### 1) Direktleuchte Graft

Eh 549 Lux

Ev(mel) 111 Lux

#### 2) Indirektleuchte ScubaT16

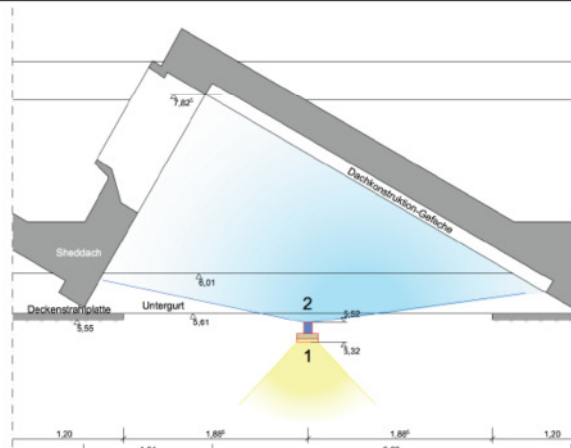
Eh 194 Lux

Ev(mel) 143 Lux

#### Summe Komponenten 1 und 2

Eh 743 Lux

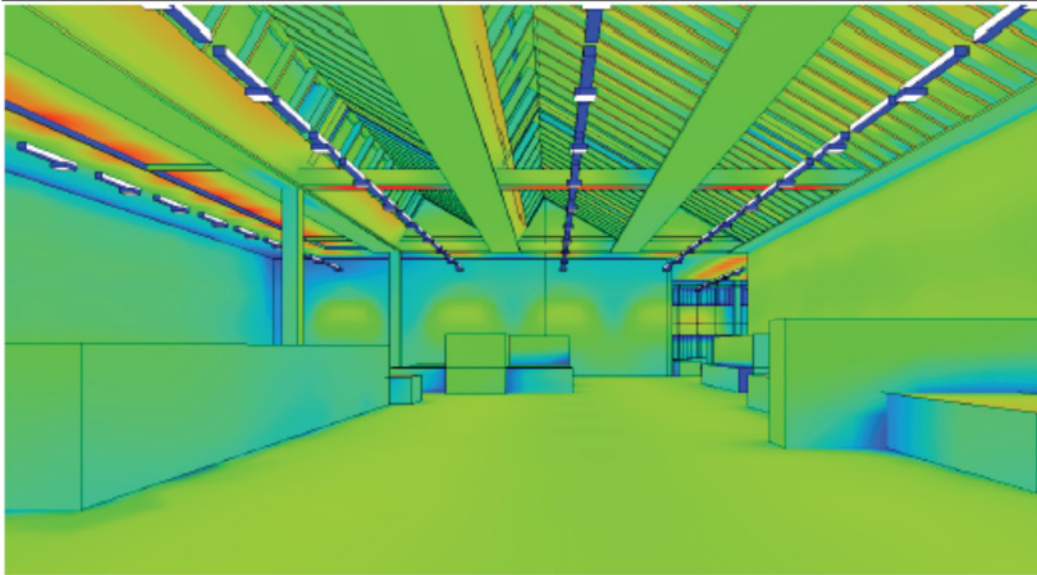
Ev(mel) 254 Lux



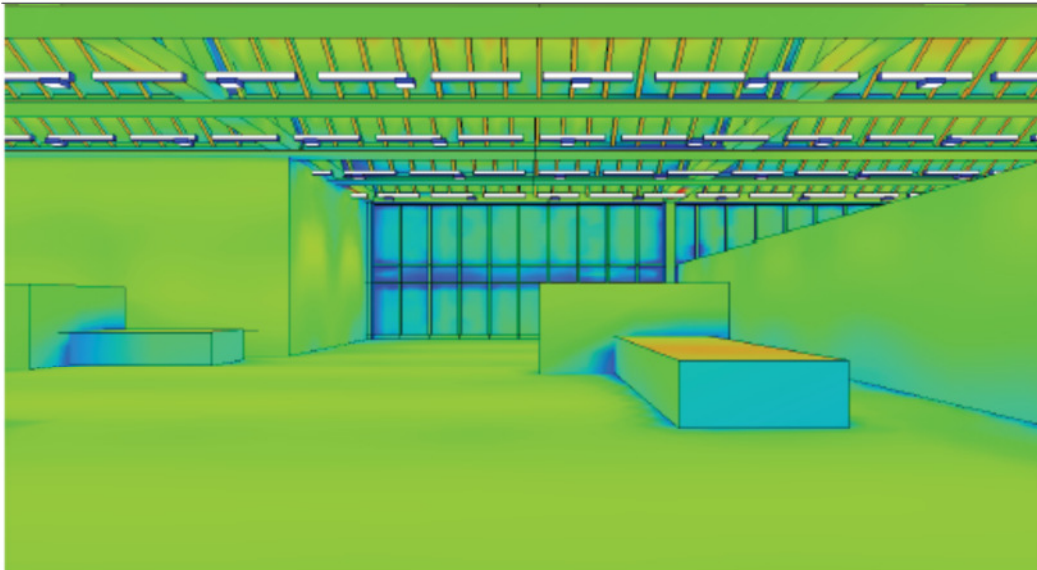
Blick in die Produktionshalle



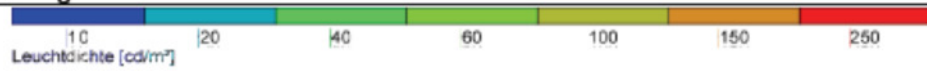
Blick längs zur Halle



Blick Quer zur Halle



Skalierung



#### 4.2.4 Ergebnis

Gegenüber herkömmlichen Beleuchtungsinstallation ergeben sich Mehrkosten wie folgt:

Anstrich Decke (für Indirektbeleuchtung)	34.220,00 €
Mehraufwand - Beleuchtung im Produktionsbereich inkl. LED- Ausführung	75.786,00 €
Mehraufwand Indirektleuchten für circadiane Wirksamkeit (ohne Montage)	25.352,65 €
Mehraufwand Lichtsteuerung	32.000,00 €
Konzeptentwicklung / Zuarbeit für Entwurfsplanung	8.059,80 €
Tages- und Kunstlichtsimulation	9.211,20 €
Inbetriebnahme und Abnahme der lichttechnischen Anlagen mittels Messung durch externe Fachkräfte	4.605,60 €

### 4.3 Kostenermittlung Monitoring

#### 4.3.1 Aufgabenstellung

Schaffung einer visuell-grafischen Darstellung die den Energieverbrauch für Mitarbeiter in einem Produktionsbetrieb mit dessen komplexen Zusammenhängen möglichst einfach und verständlich für die Menschen im Unternehmen darstellt.

#### 4.3.2 Zielsetzung

Die ursprüngliche Zielsetzung war es, den Menschen durch Visualisierung arbeitsplatzbezogener Informationen – bspw. energetischer Parameter der genutzten Maschinen - die Möglichkeit zur direkten Interaktion in seinem Umfeld zu geben und hierdurch den Menschen individuell angepasste Arbeitsbedingungen zu bieten, die einem erhöhten Wohlbefinden der Mitarbeiter dient und energiesparende Verhaltensweisen unterstützt.

Diese Zielsetzung konnte in dieser Form nicht aufrechterhalten werden. Zum einen bedingt durch einen Sicherheitsaspekt bei dem Thema der circadian wirksamen Beleuchtung. Zum anderen wegen fehlenden Eingriffsmöglichkeiten in die Maschinenteknik, da hier durch Manipulation der Maschinenteknik die CE-Kennzeichnungen der Hersteller Ihre Gültigkeit verlieren.

Die Zielsetzung wurde den geänderten Rahmenbedingungen angepasst und die Visualisierung der komplexen Systeme und deren Wirkungsweisen auf die Führungsebene ausgerichtet.

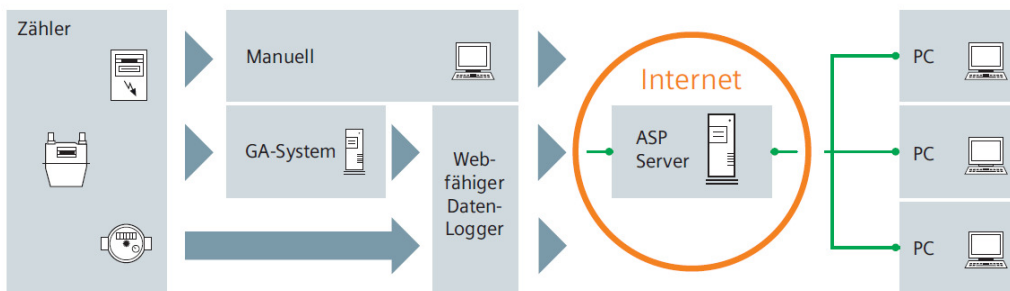
### 4.3.3 Ergebnis

Im Rahmen eines integrierten Planungsprozesses wurden mehrere Varianten untersucht.

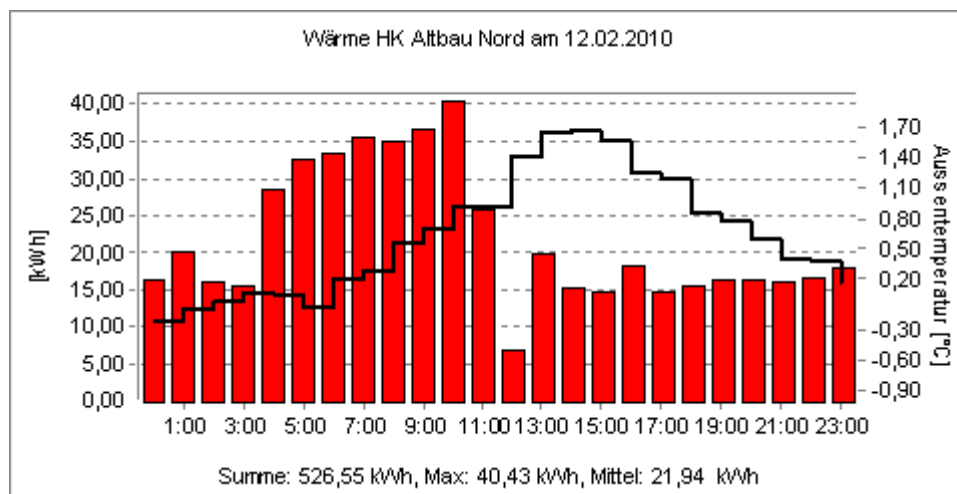
Die effektivste und dauerhaft günstigste Lösung die Energieverbräuche zu senken, bietet die Installation einer automatischen Verbrauchserfassung. Bei einem so genannten Energiezähler - Managementsystem handelt es sich um eine Kommunikationsstruktur aus einem Datensammler mit einer Übertragungseinrichtung zu einer zentralen Rechneinheit.

Dieser speichert viertelstündlich die Zählerstände und übermittelt sie einmal täglich per Telefonmodem an die Gebäudeleittechnik. Dort werden diese automatisch auf Grenzwertüberschreitungen überwacht und in einer Datenbank gespeichert. Diese Daten können online auch direkt vom jeweiligen verantwortlichen Mitarbeiter eingesehen werden.

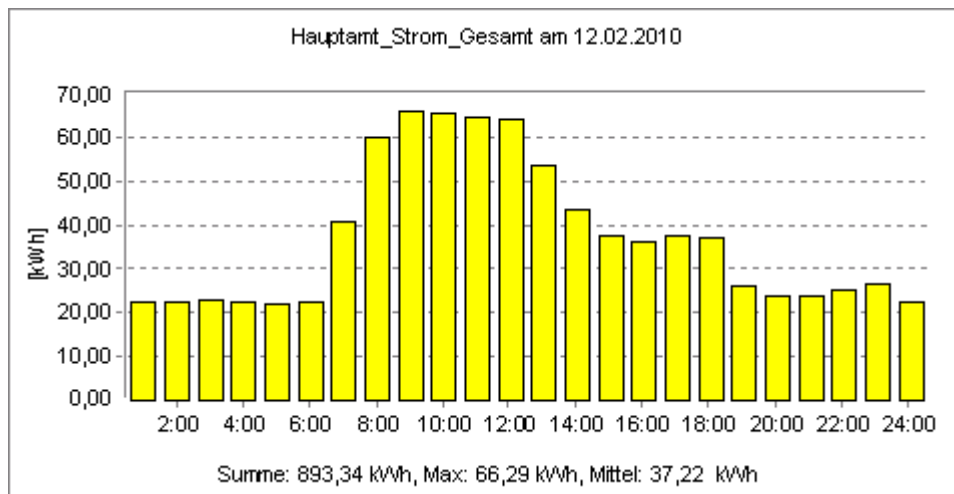
Eine schematische Darstellung der verschiedenen Energiedatenaufnahme finden Sie in der nachfolgenden Darstellung:



Beispielhaft werden nachfolgend Lastgänge des Wärme- und Stromverbrauchs Produktions-anlage dargestellt, die mittels automatischer Verbrauchserfassung generiert werden.



Wärmebedarf in kWh in Abhängigkeit von der Außentemperatur.



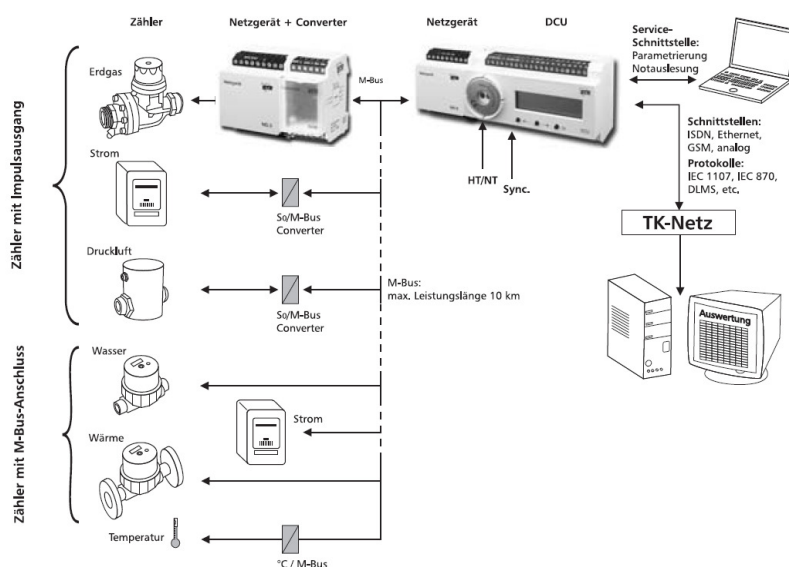
Stromverbrauch

Die Gewinnung der Verbrauchsdaten ist also auf vielfältige Weise möglich, in den meisten Fällen wird es anfänglich eine Kombination aus manuellen und automatischen Erfassungsmöglichkeiten sein. Die manuelle Ablesung sollte aber schrittweise durch eine automatische Datenerfassung ersetzt werden, da diese über einen längeren Zeitraum sicherlich die wirtschaftlichste und effektivste Methode darstellt.

Übersicht zu notwendigen Investitionen (Messtechnik, Steuerung, Datenverwaltung etc.)

Zum Aufbau einer Zählermanagementstruktur sind internetfähige Datensammler bzw. Datenlogger mit Telefonmodem in den jeweiligen Liegenschaften erforderlich, die mit einer zentralen Datenbank verbunden sind. Aus dieser Datenbank werden dann diverse Auswertungen wie Lastprofile, Energiebericht, CO<sub>2</sub> Bilanzen usw. generiert, die online ausgelesen werden können.

Der Datenlogger mit Modem wird räumlich in die Nähe der Verbrauchszähler gesetzt und ist in der Lage mehrere Zählwertsignale über mehrere Tage zu speichern, bis die Daten über eine Telefonverbindung von den Zentralrechner in die Datenbank ausgelesen werden und dort für Auswertungen zur Verfügung stehen. Ein prinzipieller technischer Aufbau eines solchen Systems ist nachfolgend schematisch dargestellt.



#### 4.3.4 Ergebnis

Die im Rahmen des Planungsprozesses definierten Zielsetzungen können mit marktüblichen Produkten realisiert werden. Durch die Kombination von gängigen Produkten können die gewünschten Ergebnisse mit vertretbarem wirtschaftlichem Aufwand realisiert werden. Eine ggf. höhere Anfangsinvestition amortisiert sich durch die geringeren Betriebskosten.

Dank des umfangreichen Energiemonitorings war es erst möglich, die Inbetriebnahme und erste Optimierung der komplexen Anlagen überhaupt zu bewältigen.

Für den Betrieb und die kontinuierliche Überwachung der Anlagen im Nachgang des Intensivmonitorings wurde durch Komplexitätsreduzierung ein Analysetool erstellt. Dies dient der laufenden Überwachung der Anlagen, aber auch der Analyse und Bewertung von durchgeführten Maßnahmen zur Energiereduzierung. Das umfangreichere Datenmaterial aus der Inbetriebnahme wird weiterhin gespeichert und steht bei Bedarf für detaillierte Analysen zur Verfügung. Eine Auswertung kann hier jedoch nicht mehr in Eigenregie erfolgen.

Aufgrund der angelegten Datenstruktur können in Zukunft Kennzahlen entwickelt werden, die unter Berücksichtigung von Produktivität und Betriebszeiten einzelner Maschinen für ein aktives Energiemonitoring sinnvoll sind.

Die Planung des Monitorings beginnend von den notwendigen Sensoren und Daten sollte bereits unter zwei Aspekten erfolgen. Aspekt 1 sind die Ausstattungen, welche benötigt werden, um die Inbetriebnahme der technischen Anlagen zu unterstützen. Aspekt 2 sind die notwendigen Ausstattungen für den laufenden Betrieb und dessen Überwachung.

Abweichungsanalysen von Zielvorgaben oder Werten aus Vorperioden (oft Vorjahreswerte) können in der Regel erst nach Ablauf einer Betrachtungsperiode erfolgen.

Gleiches gilt für die Betrachtung der Wirksamkeit von durchgeführten Optimierungsmaßnahmen. Die Zeit des intensiven Energiemonitorings im Rahmen des Projektes wurde überwiegend benötigt, um die ersten Betriebsoptimierungen durchzuführen und ein Monitoring für den laufenden Betrieb zu entwickeln.

Der konkrete Mehraufwand gegenüber einem Standard in der Gebäudeleittechnik ist schwierig abzuschätzen, da die Ausstattung von Gebäuden mit Gebäudeleittechnik sehr unterschiedlich ist und kein Referenzwert besteht. Der aufgeführte Mehraufwand beruht daher auf einem Vergleich der vielschichtigen Anlagentechnik beim Bauobjekt, bedingt durch die Vielzahl und Komplexität der vorhandenen technischen Gewerke und die Themen des Förderantrags, in Bezug auf ein angenommenes mittleres Ausstattungsniveau.

Sensorik für das Gewerk Elektrotechnik	25.000,00 €
Sensorik für das Gewerk Heizung	35.000,00 €
EDV-Technische Ausstattung	18.500,00 €
Visualisierungs-Tool	15.000,00 €
Monitoring Inbetriebnahme inkl. Sachkosten	20.800,00 €
Monitoring Laufzeit (Jahreszyklus) inkl. Sachkosten	58.500,00 €
Abschluss und Überführung in Langzeitmonitoring	6.400,00 €

## **4.4 Abstimmen, überwachen und dokumentieren der geplanten Ausführungsdetails in der Ausführungsphase**

### **4.4.1 Aufgabenstellung**

Die in der Planungsphase integral erarbeiteten Detaillösungen werden mit der ausführenden Firma in einem ersten Schritt auf ihre Tauglichkeit der Umsetzbarkeit überprüft. Details werden schon in der Werkplanung auf Grund von produktions- und montagetechnischen Anforderungen angepasst und überarbeitet. Die daraus resultierenden Erfahrungen sind Teil des Forschungsauftrages und werden dokumentiert. In einem nächsten Schritt werden während der Produktion und der Errichtung des Holzbaus die in der Planung angenommenen Umstände und Abläufe auf deren Richtigkeit untersucht. Diese Beobachtung der Detaillösungen wird bis ca. 24 Monate nach der Fertigstellung des Gebäudes weitergeführt, um eventuelle Wechselwirkungen der unterschiedlichen Bauteile bzw. deren Resistenz gegen äußere Einflüsse protokollieren zu können.

### **4.4.2 Zielsetzung**

Die erarbeiteten Detaillösungen sollen in Zusammenarbeit mit der ausführenden Firma optimiert und in Folge umgesetzt werden. Am Ende des Beobachtungszeitraumes werden die speziell erarbeiteten und umgesetzten Detaillösungen auf Ihre Gebrauchstauglichkeit überprüft und in Bezug auf Ihre Dauerhaftigkeit, Formstabilität u.dgl. beurteilt.

### **4.4.3 Ergebnis**

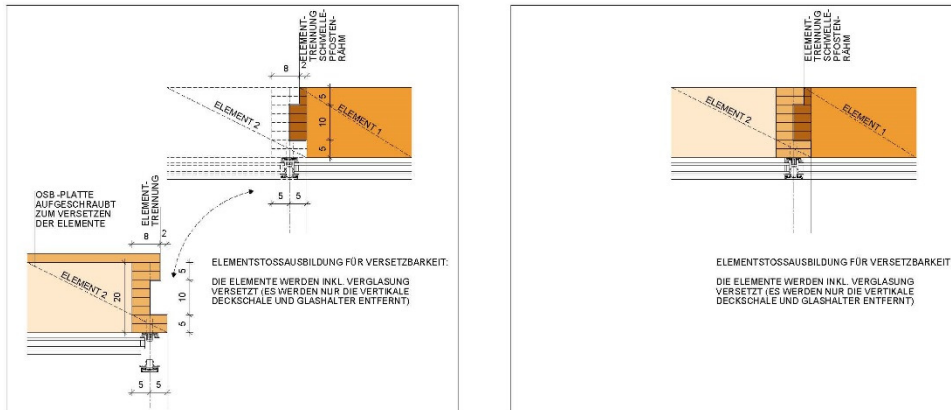
Der Holzbau eignet sich durch die Möglichkeit einer umfassenden Vorfabrikation im Werk und einem raschen Versetzen auf der Baustelle auch später hervorragend dafür, die Elemente wieder zu demontieren. Nach der Demontage können sie, bei einer entsprechenden Wahl der Verbindungsmittel, ohne größere Beeinträchtigung wieder an neuer Stelle eingebaut werden.

Beim Ortsaugenschein vom 11.08.2016 hat sich herausgestellt, dass die Gebrauchstauglichkeit aller Detailpunkte ohne sichtbare Veränderung im Hinblick auf Dauerhaftigkeit, Dichtheit und Formstabilität gegeben ist.

#### **4.4.3.1 Südfassade**

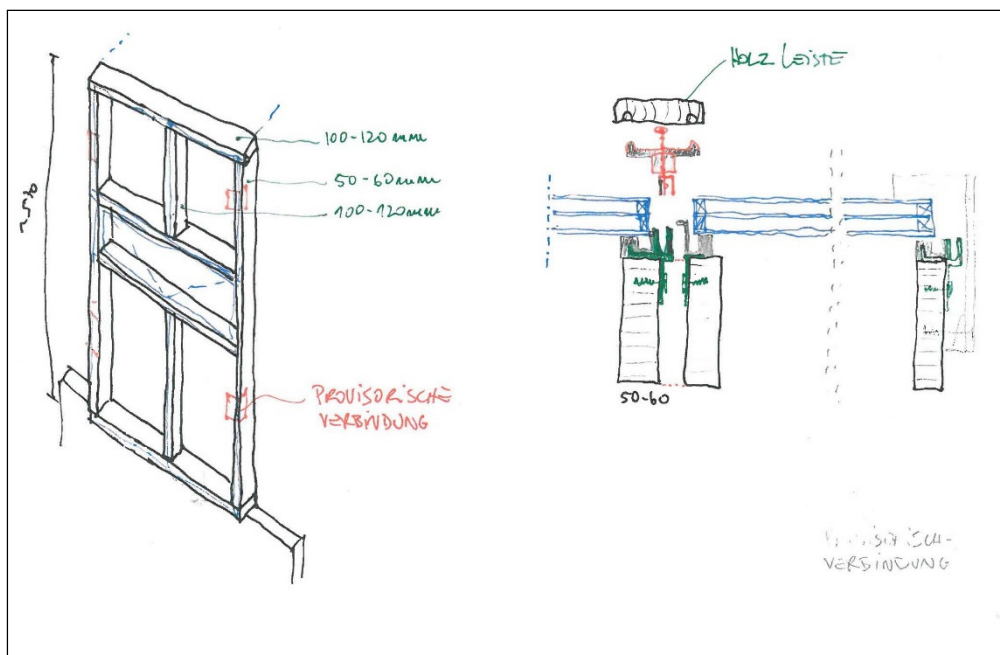
Der Großteil der Südfassade besteht eigentlich aus einer Pfosten-Riegel-Fassade. Beim Versetzen der Fassade könnte das Glas entfernt und die Holzkonstruktion demontiert und versetzt werden. Dabei ist aber der Arbeitsaufwand sehr groß und das Problem der Zwischenlagerung für die entfernten Glasscheiben stellt sich. Es wurde versucht einen Weg zu finden, bei dem die Glasscheiben mit der Konstruktion entfernt werden können. Dabei stellt sich das Problem, wie sonst im Elementbau auch, wie die Elementstöße ausgebildet werden.

Hier gab es mehrere Entwicklungsschritte und Ideen. Der Weg führte über zwei gekoppelte Pfosten mit jeweils einem Aufsatzprofil zu der Idee, den Pfosten so zu teilen, dass das Aufsatzelement am Pfosten verbleiben kann. Gehalten wird dann die Verglasung beim Versetzen nur durch die horizontalen Klemmleisten.



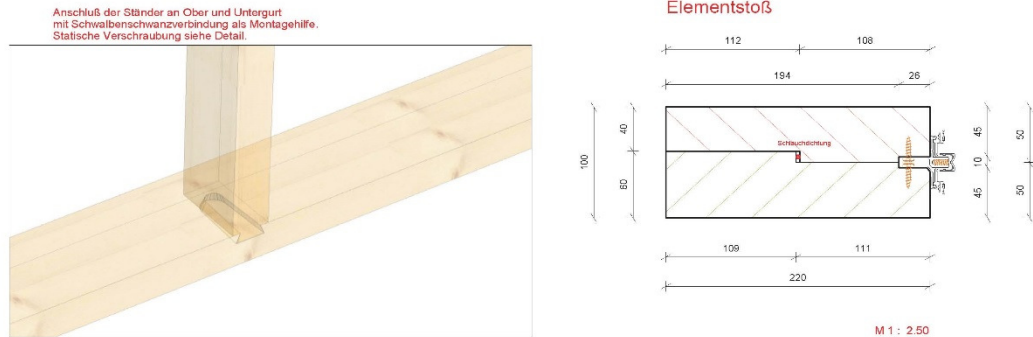
Detail Pfosten bei der Verglasung Südfassade

Die Idee wurde dann aber noch weiterentwickelt. Es gibt am Markt von der Firma Raico ein Aufsatzprofil, das in sich schon geteilt ist. Damit kann der Querschnitt des Pfostens etwas weniger aufwändig gestaltet werden. Ein geteilter Pfosten, auf den das geteilte Aufsatzelement montiert wird, bietet die optimale Lösung für die Versetzbarkeit der Elemente. Für diese Variante hat man sich dann auch in der Ausführung entschieden.

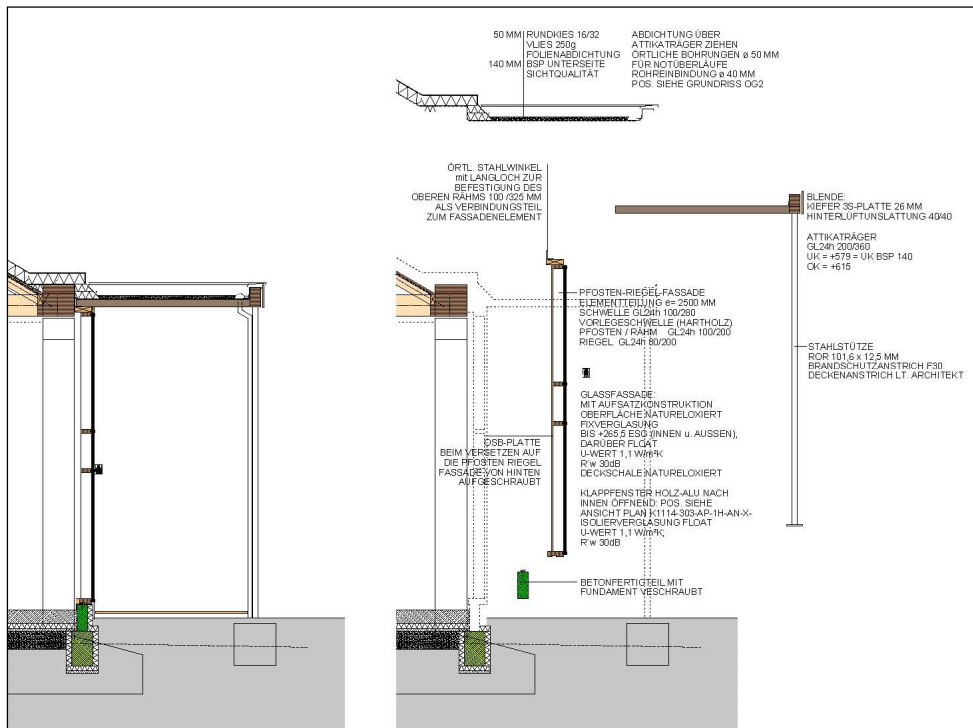


Skizze Pfosten-Riegel-Fassade Süden



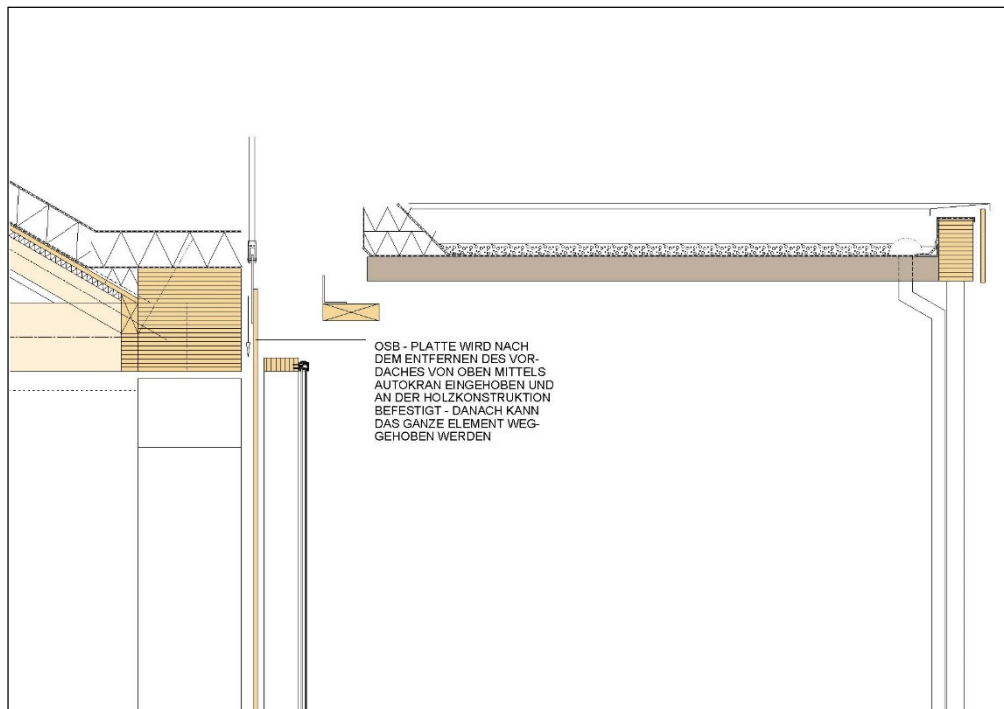


Detail Werkplanung Fa. Gump & Maier



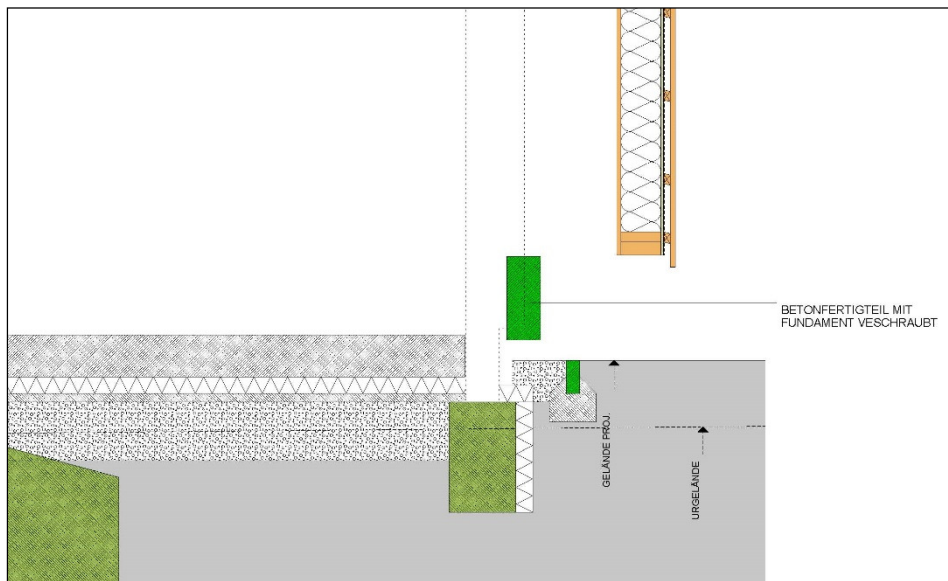
Schnitt Pfosten-Riegel-Fassade Süden Montageschritte

Damit ist es möglich, das Element mit der Verglasung zu versetzen. Das Vordach wird entfernt. Der obere Anschluss ist so gestaltet, dass danach von oben über die gesamte Elementbreite eine Holzplatte nach unten eingeschoben werden kann. An dieser Holzplatte wird die Konstruktion von innen befestigt und mit dem Glas nach oben gehoben. Nach der Zwischenlagerung können die Elemente wieder analog dem Entfernen in die Gebäudehülle integriert werden.



#### Oberer Anschluss Pfosten-Riegel-Fassade Süden

Die Holzelemente der Fassade und auch die Pfosten-Riegel-Fassade stehen nicht direkt auf der Bodenplatte auf. Damit sie spritzwassergeschützt sind, und auch um der aufsteigenden Feuchtigkeit keine Möglichkeit zum Eindringen zu bieten, sind sie auf einer ca. 20 Zentimeter hohen Betonaufkantung aufgesetzt. Bei einer Erweiterung der Halle ist natürlich diese Aufkantung im Weg. Es wurde beschlossen, diesen Betonriegel nicht wie üblich aus Ortbeton herzustellen, sondern stattdessen ein Betonfertigteile zu verwenden. Dieses Fertigteile ist mittels Schrauben mit dem darunter liegenden Ortbetonstreifenfundament verbunden. So kann es leicht entfernt werden. Die neue Bodenplatte wird dann direkt an die bestehende Platte angeschlossen und die Fertigteile können wieder verwendet werden.



Sockelausbildung



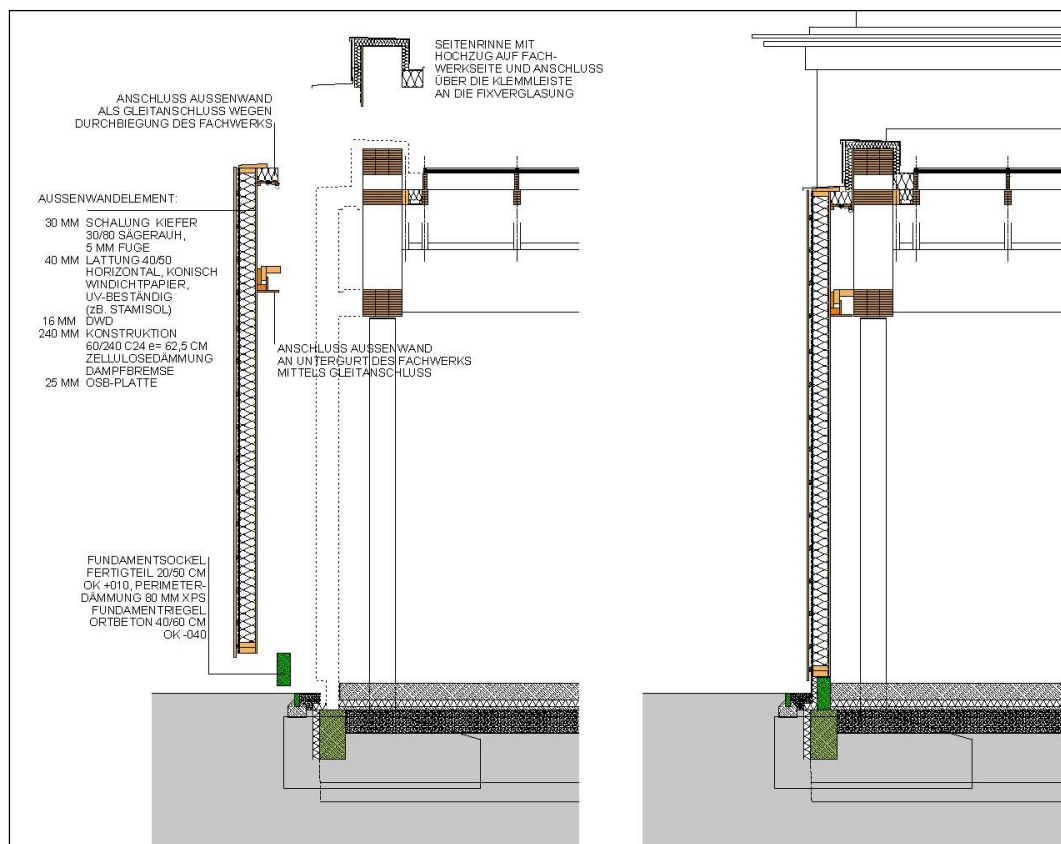
Ansicht Südfassade

#### 4.4.3.2 Westfassade

Auch die Westfassade ist flexibel gestaltet, da das Gebäude auch in diese Richtung eine Erweiterung ermöglichen soll. Hier stellen sich die gleichen Probleme wie an der Südseite. Der untere Anschluss wurde gleich gelöst – ein verschraubtes Betonfertigteilelement übernimmt die Rolle der Sockelausbildung und kann bei Bedarf leicht entfernt werden.

Da die Wand aber versetzbar sein muss, kann sie keine Lasten aus dem Träger übernehmen. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass der Fachwerkträger an der Fassade sehr große Verformungen aufweist.

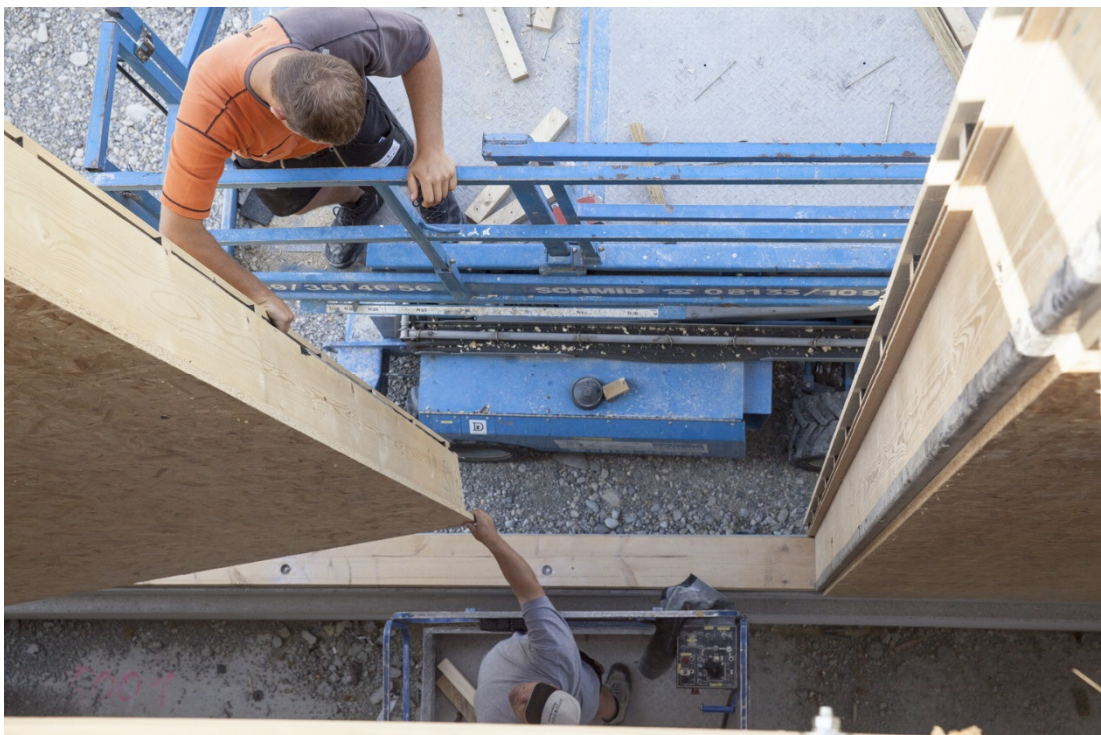
Diese Verformungen können nicht in die Wandelemente eingeleitet werden und die Wandelemente können die Verformungen nicht aufnehmen. Die einzige Möglichkeit, um keine Bauschäden zu produzieren, ist ein Entkoppeln von Tragwerk und Wandelement. Die Wand wurde mit einem deutlichen Abstand zum Träger errichtet und über einen Gleitanschluss horizontal an das Tragwerk angebunden.



Schnitt Westfassade Montagefolge



Fassadenelemente Südfassade



Elementstoß Westfassade

## **4.5 Dokumentation in Buchform**

### **4.5.1 Aufgabenstellung**

Erarbeitung einer Buchpublikation mit ca. 120 Seiten unter Einbeziehung eines Grafikers und eines Verlages.

### **4.5.2 Zielsetzung**

Nachdem der Beobachtungszeitraum abgeschlossen ist, entsteht nun eine Monografie des neuen Werkstättengebäudes mit Darstellung sämtlicher Erkenntnisse aus den beiden Forschungsprojekten.

### **4.5.3 Ergebnis**

Noch offen

## 4.6 Planung und Umsetzung einer biodynamisch wirksamen Kunstlichtanlage

### Überblick/Aufgabenstellung/Ausgangssituation



**Abbildung 1 – Kunstlichtlichtszene in der Haupthalle (Kunstlicht-Dimmlevel bei 100%);  
Quelle: Zumtobel**

Seit der erstmaligen Beschreibung eines neu entdeckten Photorezeptors im Auge des Menschen im Jahr 2001 hat sich die Wissenschaft intensiv mit den Konsequenzen dieser Entdeckung beschäftigt. Heute ist gut belegt, dass durch Licht auch biologische Wirkungen über das Auge vermittelt werden und nicht nur der reine Sehvorgang. Biologische Effekte wie die Steuerung des Hormonhaushaltes, die Regulation des gesunden Schlafes und die Leistungsfähigkeit werden durch diesen neu entdeckten Photorezeptor über die Detektion hauptsächlich des blauen Spektralanteils von (Tages-)Licht ermöglicht.

Die klassische Lichtplanung befasst sich, von wenigen Ausnahmen abgesehen, ausschließlich mit den visuellen Wirkungen des Lichtes. Im Projekt Neubau IWL gGmbH sollte über diese Anforderung hinaus eine biologisch wirksame Beleuchtungslösung konzipiert, geplant und ausgeführt werden. Will man diese Wirkungen planen und messtechnisch erfassen, müssen die bisherigen beschreibenden Parameter der Lichttechnik erweitert werden. Die  $v(\lambda)$ -Kurve, die in den 1920er Jahren definiert wurde, ist für die Bewertung der nicht-visuellen Wirkungen von Licht über das Auge nicht ausreichend.

Im Jahre 2006 wurde begonnen, die wissenschaftlichen Ergebnisse aus der humanbiologischen Forschung in die Lichttechnik zu überführen. Vom Normenausschuss Lichttechnik (FNL) wurde erst eine Vornorm (DIN V 5031-100) entwickelt, die nun in der Version von 2009 verfügbar ist und weiterführend als DIN SPEC 5031-1001 veröffentlicht ist. Dieses Dokument beschreibt die Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren zur messtechnischen Erfassung von nichtvisuellen Wirkungen. Ergänzend dazu wurde der Fachbericht DIN SPEC 67600 im Jahre 2013 veröffentlicht, der Planungsempfehlungen für circadian wirksame Beleuchtung enthält und für dieses Projekt als Basis für die biologischen Anforderungen diente.

Ist eine Planung für biologische Lichtwirkung überhaupt erforderlich? Kann bei guter Tageslichtversorgung der Innenräume oder einem hohen Kunstlichtangebot automatisch von einer biologischen Wirksamkeit ausgegangen werden? Folgende Thesen zeigen, weshalb es dies in einer dezidierten Planung zu hinterfragen gilt:

In der klassischen Kunstlichtplanung wird in der Regel ein Fokus auf horizontale Beleuchtungsstärken gelegt. Für die biologische Wirksamkeit ist die Helligkeit am Nutzerauge entscheidend. Ein gezieltes Überschreiten der biologischen Wirkschwelle ist ohne deren eigenständige Planung eher unwahrscheinlich.

Berechnungen in der Planung basieren zudem auf der Empfindlichkeit des Menschen im visuellen Spektrum. Kunstlichtquellen besitzen jedoch in vielen Fällen einen biologischen Wirkfaktor kleiner 1,0<sup>2</sup>. Zudem haben die Reflektionseigenschaften von Oberflächen einen erheblichen – oftmals nachteiligen – Einfluss auf die spektrale Zusammensetzung des Lichtes wenn es letztendlich das Auge erreicht.

Besonders wirksam hat sich bei gleicher Dosis eine Verteilung der Helligkeit über einen großen Raumwinkel gezeigt. Bei vielen Anlagen wird jedoch aus energetischen Gründen ein Indirektanteil gar nicht oder nur in geringem Umfang vorgesehen.

Tageslicht, mit einem i.d.R. hohen biologischen Wirkfaktor, ist unter den richtigen Umständen ausreichend um die biologische Wirkschwelle zu erreichen. Arbeitsplätze sind aus Gründen der Blendungsbegrenzung jedoch selten direkt auf Fensterflächen ausgerichtet, sondern häufig in einem 90° Winkel zur Fassade. Dies reduziert die Helligkeit am Auge deutlich.

Biologische Aktivierung ist vor allem in den Morgenstunden erforderlich. Abhängig von der Jahreszeit ist das Tageslicht nicht ausreichend, um die gewünschte biologische Wirkung in dieser Zeit zu erreichen.

Damit biologisch wirksames Licht unter wirtschaftlichen, energetischen und ökologischen Gesichtspunkten sinnvoll umgesetzt werden kann, ist demnach eine Tages- und Kunstlichtplanung sowohl nach klassischen als auch nach circadianen Gesichtspunkten notwendig.

---

<sup>1</sup> DIN SPEC: Dokumente die zusätzlich zur konsensbasierten Normung vom DIN veröffentlicht werden.

<sup>2</sup> Bei einem biologischen Wirkfaktor von 1,0 entspricht 1 Lux Beleuchtungsstärke 1 Lux melanopisch-bewerteter (biologisch wirksamer) Beleuchtungsstärke



Da die dezidierte Lichtplanung im Projekt vergleichsweise spät in der integralen Planungsphase eingebunden wurde, war der Einfluss auf Geometrie und Position Tageslichtöffnungen nur noch begrenzt möglich.

Dennoch konnte die nutzbare Tageslichtmenge im Raum im Zuge der Planung erheblich erhöht und das Blendungsrisiko gleichzeitig sogar verringert werden. Die Tageslichtsituation im Raum war die Ausgangsbasis für die biologisch wirksame Beleuchtungsanlage, die das Tageslicht energetisch sinnvoll ergänzen sollte. Um dieses Angebot sowohl für die klassischen Aufgaben der Lichtplanung, als auch der biologisch wirksamen Beleuchtung zu ermitteln, wurde ein Jahresgang des Tageslichts für horizontale und vertikale Beleuchtungsstärken an wichtigen Nutzerpositionen simuliert. Neben der in der Planungspraxis geläufigen Tageslichtautonomie zur Bewertung der Tageslichtversorgung wurde erstmals eine „circadian-Autonomie“ (siehe Kapitelabschnitt „Tageslicht“) aus der Simulation ermittelt. Diese erlaubt eine vergleichbare Einschätzung im Hinblick auf die circadianen Anforderungen.

Die auch biologisch wirksame Kunstlicht-Beleuchtung wurde als Zwei-Komponenten-Anlage konzipiert, deren LED-Direktlicht die Erfüllung aller Sehaufgaben bei energetisch sehr geringem Aufwand erlaubt. Durch eine T16-basierte Indirektkomponente mit sehr hoher Farbtemperatur wird schließlich die biologische Wirkschwelle am Auge erreicht. Da biologisch wirksames Licht spektral anders bewertet wird als das sichtbare Licht, wurde eine Reihe von Holzanstrichen bzgl. ihrer spektralen Reflektion vermessen und die Ergebnisse zurück in die Planung überführt.

Mit der Berechnung von flächenaufgelösten zylindrischen Beleuchtungsstärken unter Berücksichtigung der spektralen Eigenschaften von Leuchten und Oberflächen wurde der klassische Planungsprozess konsequent erweitert.

Eine eigens für das Projekt entwickelte Strategie des Lichtmanagements trug dem energetisch und wirtschaftlichen Betrieb ebenso Rechnung, wie der biologischen Wirksamkeit. Dies gelang durch die Verknüpfung der Kunstlichtkomponenten mit dem Tageslichtangebot, sinnvoller Zonierung sowie einem tageszeitabhängigen Profil der biologischen Aktivierung. Um spektral bewertete zylindrische Beleuchtungsstärken am Nutzerauge in der Steuerung berücksichtigen zu können, mussten die Ergebnisse der Kunst- und Tageslichtplanung auf wenige verknüpfte Parameter und Korrekturfaktoren reduziert und beschrieben werden.

Der Komplexität der Planung auch in der Ausführung gerecht zu werden ist eine Herausforderung in jedem anspruchsvollen Projekt. Da es bisher keine Erfahrungswerte für die Inbetriebnahme einer derart geplanten biologisch wirksamen Kunstlichtanlage gab, gewann diese Phase im Neubau der IWL-Werkstätten eine besondere Bedeutung. Die Einregulierung der Anlage durch den Hersteller wurde von Planerseite mit umfangreicher Messtechnik begleitet und unterstützt. Klassische Beleuchtungsstärkemessungen wurden durch spektral aufgelöste Messungen ergänzt und erlaubten so erst die notwendige finale Abstimmung der Anlage auf die Anforderungen der biologischen Wirksamkeit.

Nach Kenntnisstand der Autoren wurde in diesem Projekt zum ersten Mal eine biologisch wirksame Beleuchtungsanlage dieser Größenordnung geplant und umgesetzt. Das Projekt wurde im September 2014 auf der Tagung LICHT2014 in Den Haag in einem Vortrag vorgestellt.

## Tageslicht



**Abbildung 2 – Sheddach mit Fensterband (Nord) und weißer Dachfolie (Süd)**

Die Tageslichtuntersuchung zeigt das große Potential sowohl für biologisch wirksames Licht, als auch für ein energetisch effizientes und ansprechendes Lichtkonzept. Dieses Potential beschränkt sich nicht nur auf die Raumgeometrie sowie die Größe, Anordnung und Beschaffenheit der Tageslichtöffnungen, obgleich diese bedeutsame Planungsparameter darstellen. Auch die Oberflächengestaltung des Innen- und unmittelbaren Außenraumes bestimmen wesentlich das Tageslichtangebot. Durch Optimierung all dieser Punkte in mehreren Iterationsschritten (siehe Tabelle 1) konnte die mittlere Tageslichtmenge im Neubau der IWL gegenüber der Basis der Architekturplanung um fast 40% erhöht werden, ohne die Geometrie des architektonischen Konzeptes signifikant zu beeinflussen. Von zentraler Bedeutung für die gute Tageslichtnutzung ist dabei die Sheddach-Geometrie der Haupthalle, die ohne nennenswerte Blendefahr eine gleichmäßige Versorgung der Raumtiefe mit Tageslicht erlaubt. Bedingt durch die statische Höhe des Holzträgers sind jedoch nur ca. 50% der Shedhöhe transparent ausführbar.

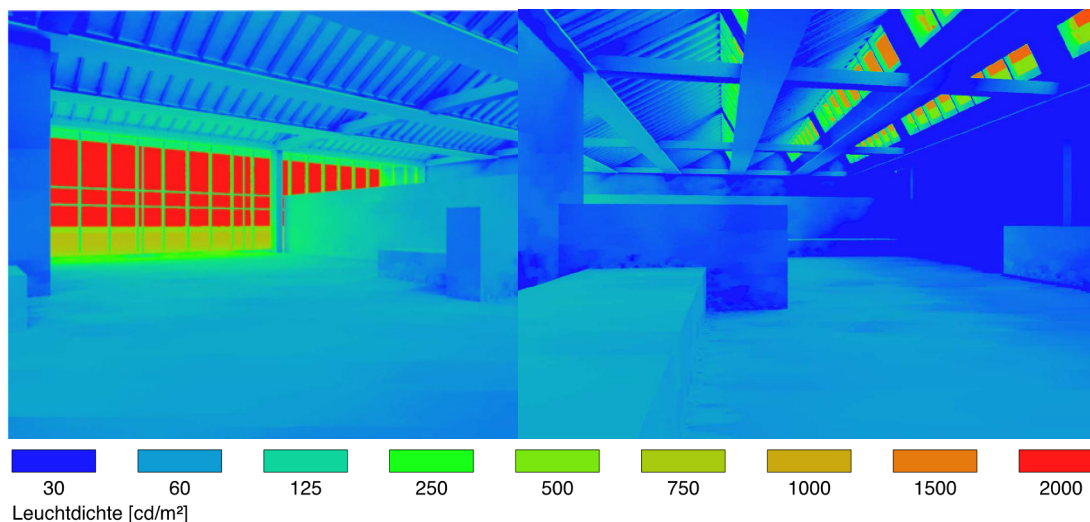
Tabelle 1 – Auszug der Iterationsschritte am Beispiel des Hallenbereichs mit Sheddächern, Auswirkungen auf den mittleren Tageslichtquotienten<sup>3</sup>

Stufe	Bezeichnung	Ø TLQ	Veränderung zu Vorstufe (bzw. genannte Stufe)
D1	Geometrie + Gläser anfängliche Planung	2,55%	
D2	D1 + Strahlplatten <sup>4</sup> (=anfänglicher Planungsstand)	2,43%	-5%
D3	D2 + weiße Gefacheinsätze halbe Höhe	2,52%	+3,5%
D4	D3 + versetzte Strahlplatten <sup>5</sup>	2,53%	+0,5%
D5	D2 weiße Gefacheinsätze ganz	2,54%	+4,5% (zu D2)
D6	D5 + versetzte Strahlplatten	2,60%	+2,5%
D7	D2 + weiße Innenkonstruktion	2,96%	+22% (zu D2)
D8	D7 + versetzte Strahlplatten	2,97%	+0% (zu D8)
D9	D8 + Shed-Verglasung T <sub>vis</sub> =+11%, Südfassade T <sub>vis</sub> = -8%	3,40%	+14% (+40% zu D2)

<sup>3</sup> Verhältniswert der horizontalen Beleuchtungsstärke im Innenraum gegenüber der horizontalen Außenbeleuchtungsstärke bei genormt diffusem Himmel

<sup>4</sup> Horizontale Wärmestrahlfplatten mit einer Breite von ca. 1,20m im Bereich der Sheddächer

<sup>5</sup> Verschiebung der Strahlplatten mittig unter den Sheddach-Tiefpunkt (siehe Abbildung 3)

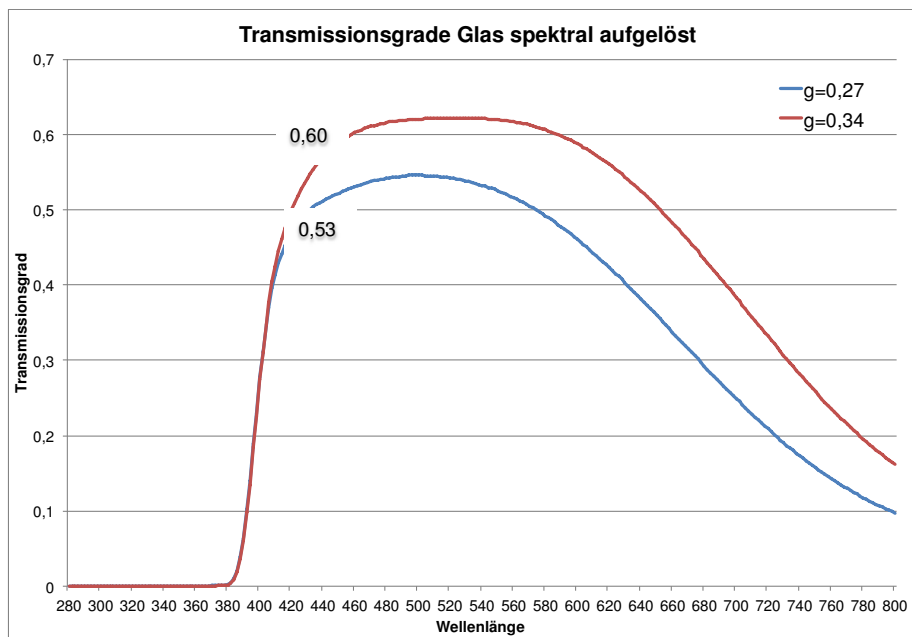


**Abbildung 3 – Falschfarbenbilder der Leuchtdichte im Innenraum. Links: Blick auf die Fassade (Süden). Rechts: Blick in die Hallentiefe (Westen).**

Jeder Iterationsschritt wurde von einer lichttechnischen Simulation begleitet, um die Tageslichtquotienten ausgewählter Bereiche zu ermitteln. Veränderte Reflektionseigenschaften der Raumbooberflächen wirken sich jedoch auch auf das architektonische Konzept aus. Aus diesem Grund wurden alle Schritte mit dem Architekturbüro Kaufmann abgestimmt. Ebenso wurden Konzeptänderungen, die die Transmissionseigenschaften der Fenster beeinflussen, mit dem Planungsbüro für das energetische Konzept erörtert und dort nachgeführt (Büro Hausladen). Dabei wurde insbesondere auch auf die Transmissionseigenschaften im biologisch wirksamen Bereich geachtet. Der relative Unterschied bei zwei Gläsern vergleichbarer Qualität von unterschiedlichen Hersteller in Bezug auf Lichttransmission und Gesamtenergiedurchlassgrad lag dabei bei im Wellenlängenbereich von 460nm bei 12,7% (siehe Tabelle 2). In Rücksprache mit Büro Hausladen konnte für die Sheddächer eine Verglasung mit geringfügig höherem g-Wert verwendet werden, was die Transmission im biologisch wirksamen Bereich insgesamt um 27,6% verbesserte.

**Tabelle 2 – Überblick der biologisch relevanten Transmissionsunterschiede von jeweils zwei Gläsern zweier Hersteller**

Sheddach-Verglasung	(U <sub>g</sub> Vorgabe)	1,0 W/m <sup>2</sup> K	
Bezeichnung	g-Wert	Tau <sub>460nm</sub>	Verbesserung gegenüber Glas 1
Glas 1 Hersteller A	0,27	0,47	
Glas 2 Hersteller B	0,27	0,53	12,7 %
Glas 3 Hersteller A	0,32	0,54	14,9 %
Glas 4 Hersteller B	0,34	0,60	27,6 %



**Abbildung 4 – spektral aufgelöster Transmissionsgrad zweier Gläser (Hersteller B) mit Abgriff bei 460nm**

Eine grundlegende Frage der Lichtplanung ist darüber hinaus, den möglichen Beitrag des Tageslichts zur Innenraumbelichtung zu kennen. Für die biologisch wirksame Beleuchtungsplanung ist diese Frage nochmals bedeutsamer – zusätzliche Investitionskosten in eine biologisch wirksame Kunstlichtanlage können eventuell reduziert werden, wenn das verfügbare Tageslicht im Jahresverlauf weitestgehend ausreicht um die Anforderungen zu erfüllen.

Zu diesem Zweck wurde eine Simulationsstudie erstellt, in der das Tageslichtangebot sowohl horizontal auf Höhe der Arbeitsflächen, als auch vertikal/zylindrisch auf Augpunkthöhe in stündlicher Auflösung für einen Tag jeden Monats berechnet wurde (jeweils für klaren und diffusen Himmel). Anhand von meteorologischen Daten wurden diese Ergebnisse gewichtet und sowohl die klassische Tageslichtautonomie ermittelt, als auch eine Autonomie bezogen auf die Anforderungen der biologisch wirksamen Beleuchtung<sup>6</sup>.

Über alle Arbeitsbereiche hinweg ergibt sich eine mittlere jährliche Tageslichtautonomie von 36% und eine mittlere „Circadian-Autonomie“ von 53%. Diese Werte zeigen, dass trotz der weitreichenden Optimierung des Tageslichtangebots über weite Teile des Jahres der Einsatz von Kunstlicht zumindest ergänzend notwendig ist. Abbildung 3 zeigt einen beispielhaften Tag sowohl für die horizontale, als auch die biologisch wirksame, zylindrische Beleuchtungsstärke an zwei Standorten in der Halle.

<sup>6</sup> Tageslicht-Beleuchtungsstärken aus Simulationsstudie, stündlich aufgelöst für klare und diffuse Tage jeden Monats, gewichtet anhand von Sonnenscheinwahrscheinlichkeiten für den Standort. Tageslichtautonomie ab 500 lx horizontal auf der Arbeitsfläche während der Arbeitszeit (8-17 Uhr). Autonomie für biologische Wirksamkeit ab 250 lx melanopisch bewerteter Beleuchtungsstärke vertikal auf Augpunkthöhe (8-11).

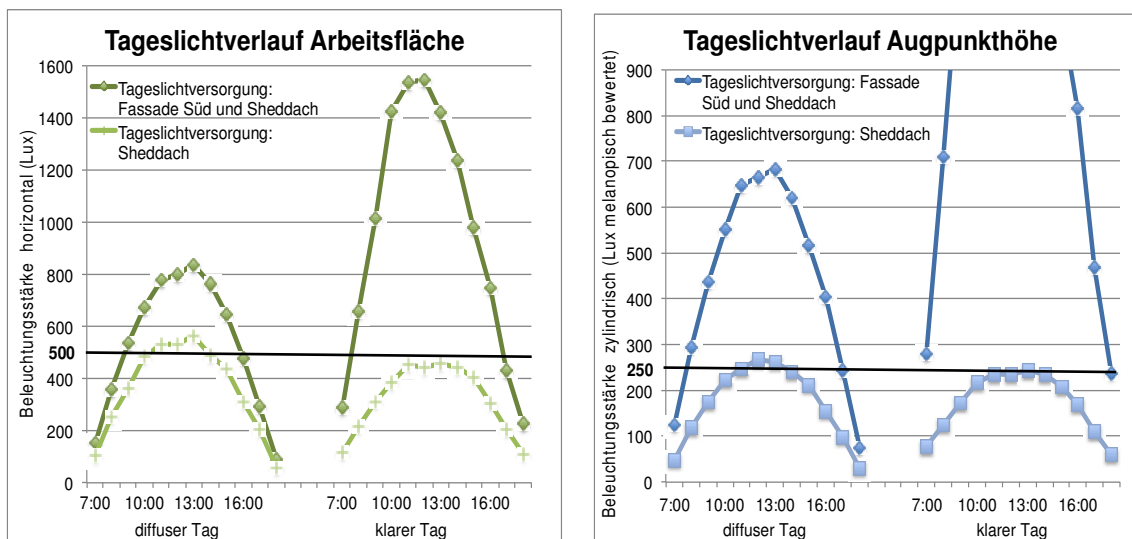


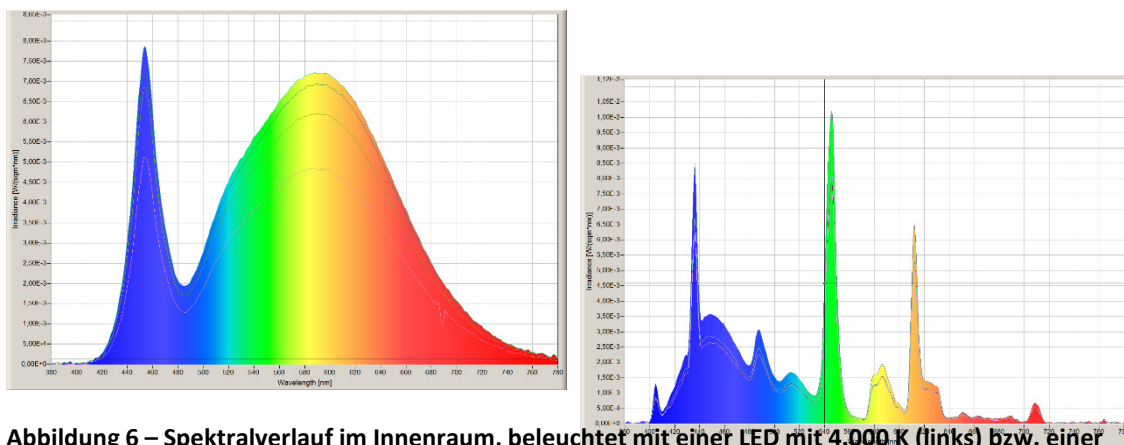
Abbildung 5 – Tageslichtbeleuchtungsstärkeverlauf ausgewählter Bereiche an einem diffusen und einem klaren Tag (21.03.)

## Kunstlicht

Unabhängig von Tageslicht muss die Kunstlichtanlage folgende Anforderungen erfüllen:

- Normgerechte Beleuchtung, Wertungswert der Beleuchtungsstärke auf 85cm Höhe (Arbeitshöhe) 500 Lux
- Biologisch wirksame Beleuchtung, Wertungswert der melanopisch bewerteten Beleuchtungsstärke auf 150cm Höhe (Augpunkthöhe) 250 Lux.

Die Auswirkung von Licht auf den circadianen Rhythmus ist dabei nicht 1:1 aus der „sichtbaren Helligkeit“ abzuleiten. Es sind in erster Linie die Blauanteile, die eine biologische Wirksamkeit bestimmen. Der Zusammenhang ist in der  $c(\lambda)$ -Kurve definiert. Damit kann aus der spektralen Zusammensetzung einer Lichtquelle ihr biologischer Wirkfaktor abgeleitet werden. In der Regel wird dieser auch im Verhältnis zum normalen Tageslicht mit einem biologischen Wirkfaktor von 1,0 beschrieben.

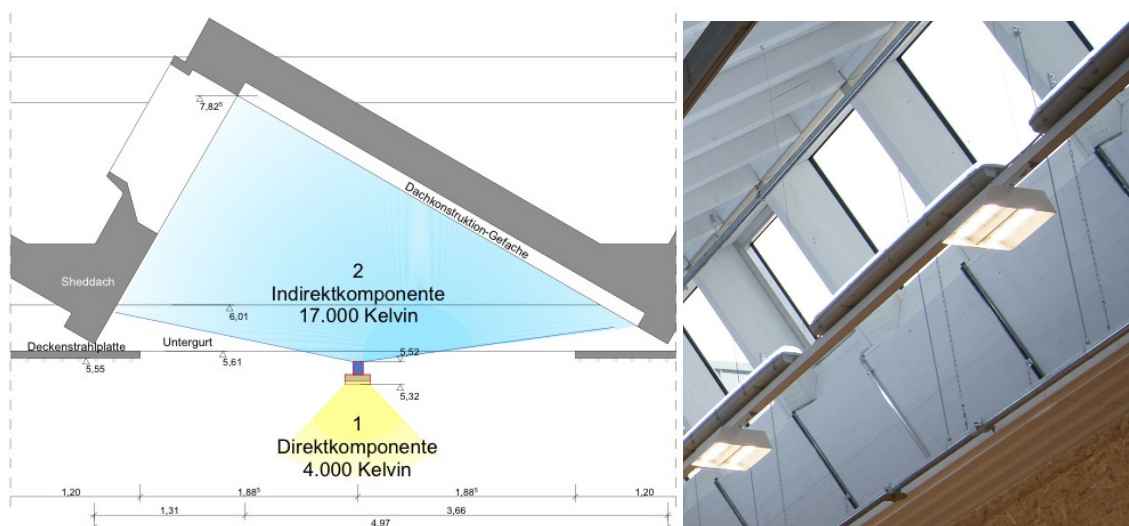


**Abbildung 6 – Spektralverlauf im Innenraum, beleuchtet mit einer LED mit 4.000.K (links) bzw. einer T16 mit 17.000 K (rechts)**

Neben diesen klar zu quantifizierenden Werten bestehen auch eine Reihe von eher qualitativen Parametern. Für eine biologisch wirksame Beleuchtung ist insbesondere von Bedeutung, dass das Licht aus einem großen Raumwinkel das Nutzerauge erreicht. Durch die so möglichst großflächige Belichtung der Netzhaut wird die biologische Wirkung maximiert.

Die Umsetzung dieser Erkenntnisse in Verbindung mit der gegebenen Raumgeometrie mündete in ein Mehr-Komponenten-Konzept (Abbildung 7). Eine LED-Direktkomponente mit einer Farbtemperatur von 4.000 Kelvin stellt die Basis des Kunstlichts dar und kann die Anforderungen an eine normgerechte Beleuchtung energieeffizient erfüllen. Der biologische Wirkfaktor dieser Komponente liegt bei 0,6.

Diese Komponente allein kann die Anforderungen an eine biologisch wirksame Beleuchtung jedoch nicht oder nur sehr ineffizient erfüllen. In Ergänzung zur LED-Beleuchtung wurde eine T16-Indirektkomponente gewählt, die auf den Decken- und Sheddachbereich ausgerichtet ist, um einen möglichst großen Raumwinkel für den Nutzer auszuleuchten. Dieses Leuchtmittel hat eine Farbtemperatur von 17.000K und einen biologischen Wirkfaktor von 1,26. Damit ist diese Lichtquelle in hohem Maße biologisch wirksam.



**Abbildung 7 – Systemschnitt der Kunstlichtkomponenten und realisierte Anlage**

Die Auslegung der Direktkomponente entspricht der gängigen Planungspraxis, da sie primär für die normgerechte Beleuchtung der Arbeitsbereiche dient. Für die Auslegung der Indirektkomponente waren hingegen die folgenden Fragestellungen zu klären:

- Wie hoch ist der Fehlbedarf zur biologischen Wirkschwelle nach Berücksichtigung des Anteils der Direktkomponente?
- Welche biologisch wirksamen Beleuchtungsstärken am Auge werden durch die Indirektkomponente erreicht?
- Ist das Reflektionsverhalten der Decke im biologisch wirksamen Bereich vergleichbar mit dem sichtbaren Bereich (=> behält das Berechnungsmodell seine Gültigkeit)?

Insbesondere die letzte Frage ist nicht einfach zu beantworten, da sie die Kenntnis der spektral aufgelösten Reflektionsdaten der Materialoberfläche erfordert. Eine umfangreiche, öffentlich zugängliche Materialdatenbank existiert nach Kenntnisstand der Autoren zum heutigen Zeitpunkt nicht. Um die Frage im Projektkontext zu beantworten wurde eine Reihe möglichen Farben und Lasuren auf das Grundmaterial Fichtenholz aufgetragen und spektral vermessen (Abbildung 8).

Die Ergebnisse dienen nicht nur als Grundlage für das Berechnungsmodell, sondern auch als konkrete Entscheidungsgrundlage für die Auswahl der Oberfläche. Aus den Messungen zeigen sich die teilweise großen Unterschiede zwischen den Materialien, sowohl was die Reflektion im biologisch wirksamen Bereich an sich betrifft, als auch bezogen auf das Verhältnis zwischen der Reflektion im Bereich um 460nm und dem gesamten sichtbaren Spektrum.

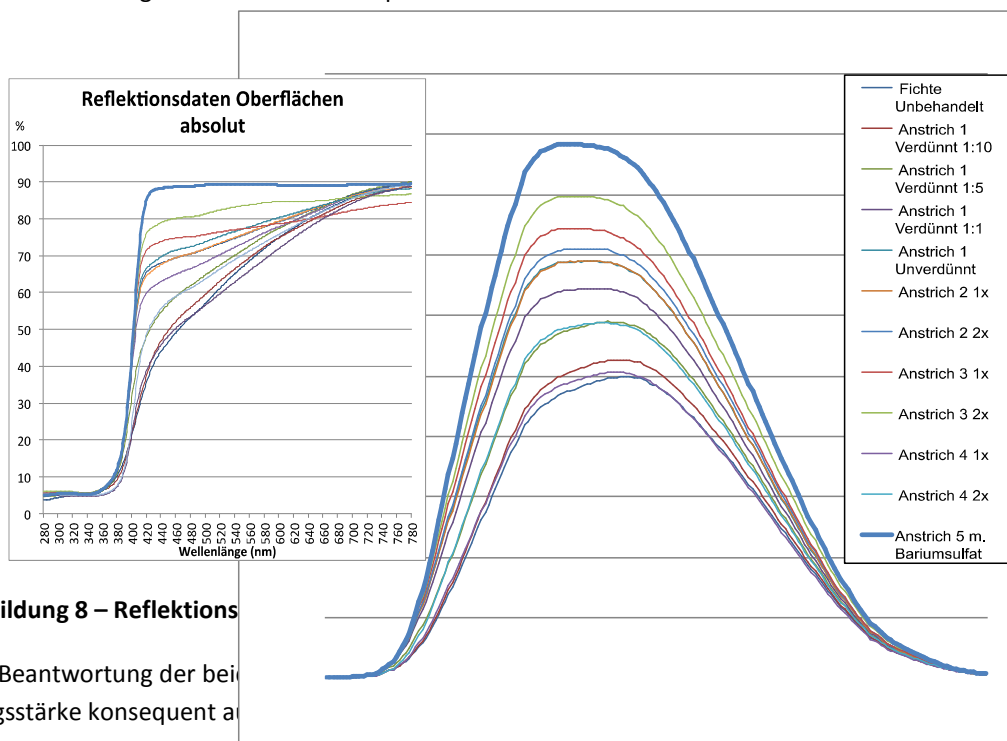


Abbildung 8 – Reflektions

Zur Beantwortung der bei  
tungsstärke konsequent a



Dazu wurden diese Größen bei der Berechnung der Kunstlichtanlage in einem Raster von 1x1m über die Arbeitsbereiche aller Hallenflächen separat für beide Kunstlichtkomponenten ermittelt (Beispiel siehe Abbildung 9) und daraus für bestimmten Funktionen zuordenbare Teilbereiche Mittelwerte, sowie die Streuung (Standardabweichung) errechnet.

Die Trennung der Komponenten ist von Bedeutung, da die verschiedenen biologischen Wirkfaktoren jeweils separat angewendet werden müssen. Bei gemeinsamer Betrachtung der beiden so nachbewerteten Kunstlichtkomponenten konnte für jeden Hallenbereich die maximal mögliche biologisch wirksame Beleuchtungsstärke durch Kunstlicht ermittelt werden.

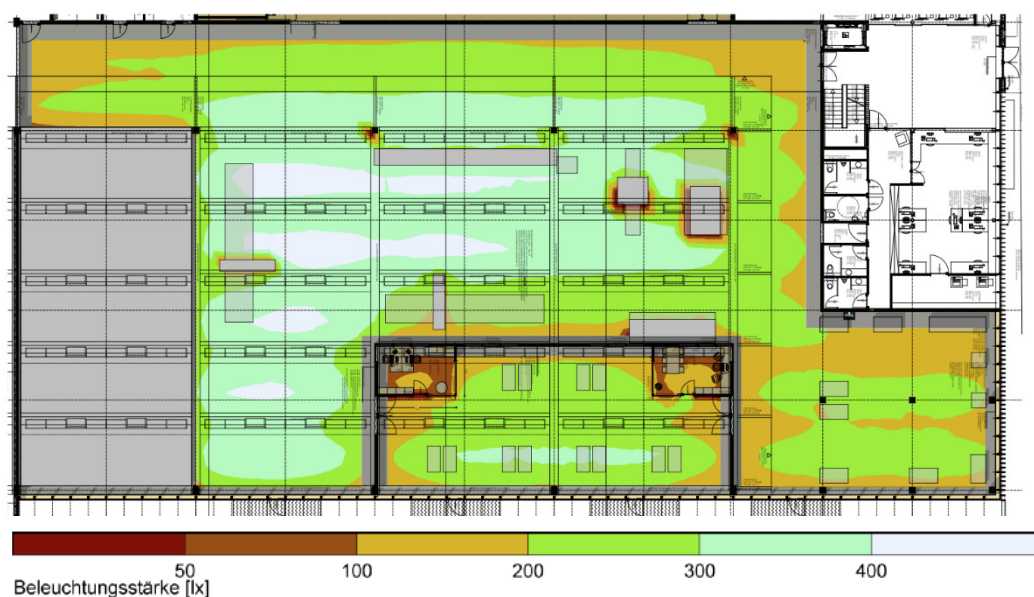


Abbildung 9 – Falschfarbendarstellung der zylindrischen Beleuchtungsstärke (H=150cm)

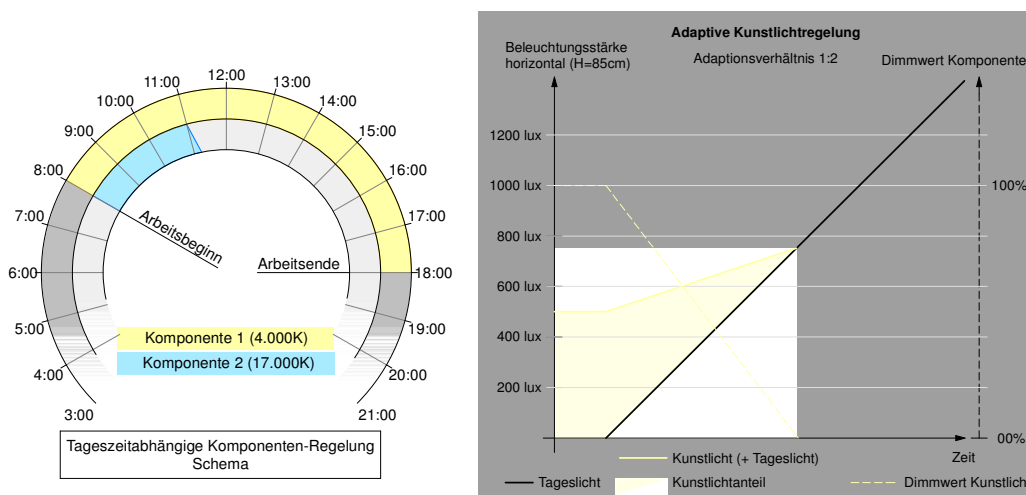
### Lichtmanagement

Die Steuerung des Kunstlichts sollte zwei Zielstellungen folgen: Ergonomie und Energie, wobei die Zielstellung der Ergonomie Priorität gegenüber der Energie besitzt. Die Zielstellungen wurden wie folgt definiert:

**Ergonomie:** Über die gesamte Arbeitszeit hinweg wird ein ausreichendes Lichtangebot zur Erfüllung der Sehaufgaben zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus wird das Lichtangebot zu vorgegebenen Tageszeiten gezielt verändert um die biologische Wirkung des Lichts sicherzustellen und damit die innere Uhr der Nutzer zu unterstützen.

**Energie:** Wenn das Tageslichtangebot ganz oder in Teilen ausreicht um das Niveau der Sehaufgabe und zur vorgesehenen Zeit die biologische Wirkung sicherzustellen werden die Kunstlichtkomponenten gezielt gedimmt bzw. ausgeschaltet um Energie einzusparen.

Konkret bedeutet das: neben einer tageslichtabhängigen Steuerkomponente muss eine parallele, tageszeitabhängige Komponente implementiert werden. Um diesen Zielstellungen gerecht zu werden, wurde eine adaptive Kunstlichtsteuerung entwickelt, die beide Komponenten entsprechend vordefinierter Randbedingungen steuert. Abbildung 10 zeigt die Systematik der beiden Steuerkomponenten separiert. Über ein Flussdiagramm, das schließlich in die Steuerung übersetzt wurde, wurden beide Elemente gekoppelt.



**Abbildung 10 – Tageszeitabhängige Programmierung der Komponenten (links) in Kombination mit der tageslichtabhängigen adaptiven Kunstlichtsteuerung (rechts)**

## 4.7 Betrieb einer biodynamisch wirksamen Kunstlichtanlage

Die Ergebnisse dieses Bearbeitungspunktes werden in Kapitel 5 des 3lpi Schlussberichts zum qualifizierten Energiemonitoring dargestellt. Dieser ist in Anhang A dem DBU-Bericht beiliegend.

## 4.8 Qualifiziertes Energiemonitoring

Die Ergebnisse dieses Bearbeitungspunktes werden in Kapitel 3 und 4 des 3lpi Schlussberichts zum qualifizierten Energiemonitoring dargestellt. Dieser ist in Anhang A dem DBU-Bericht beiliegend.

---

## 5. Fazit

### 5.1 Förderung der investiven Mehrkosten der versetzbaren Fassadenelemente des mitwachsenden Holzbaus

Die Mehrkosten für die Umsetzung des Projektes mit versetzbaren Fassadenelementen belaufen sich auf gesamt € 48.328,12.

Bei Baukosten (KG 200-500) von rd. € 9,0 Mio. sind dies lediglich Mehrkosten von rd. 0,5%.

### 5.2 Abstimmen, überwachen und dokumentieren der geplanten Ausführungsdetails in der Ausführungsphase

Der Holzbau eignet sich durch die Möglichkeit einer umfassenden Vorfabrikation im Werk und einem raschen Versetzen auf der Baustelle auch später hervorragend dafür, die Elemente wieder zu demontieren. Nach der Demontage können sie, bei einer entsprechenden Wahl der Verbindungsmittel, ohne größere Beeinträchtigung wieder an neuer Stelle eingebaut werden.

Beim Ortsaugenschein vom 11.8.2016 hat sich auch herausgestellt, dass die Gebrauchstauglichkeit aller Detailpunkte ohne sichtbarer Veränderung im Hinblick auf Dauerhaftigkeit, Dichtheit und Formstabilität gegeben ist.

### 5.3 Elektroplanung

Die im Rahmen des Planungsprozesses definierten Zielsetzungen können großteils mit marktüblichen Produkten realisiert werden. Durch die Kombination von gängigen Produkten können die gewünschten Ergebnisse mit vertretbarem wirtschaftlichem Aufwand realisiert werden. Eine ggf. höhere Anfangsinvestition amortisiert sich durch die geringeren Betriebskosten und höherer Arbeitsplatzqualität innerhalb kürzester Zeit.

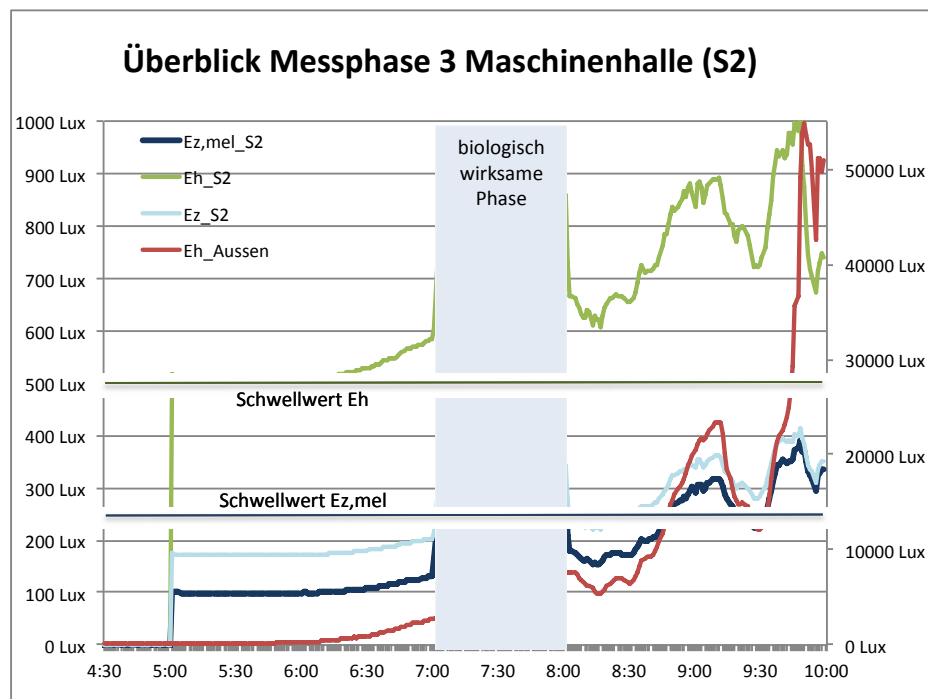
## 5.4 Planung und Umsetzung einer biodynamisch wirksamen Kunstlichtanlage

### Inbetriebnahme

In der Inbetriebnahmephase eines Projekts zeigt sich, ob die ursprünglich formulierten Zielvorgaben umgesetzt werden konnten. Dies setzt eine entsprechende Begleitung durch Planerseite voraus. Für die Inbetriebnahme der Kunstlichtanlage wurde eine Messkampagne entwickelt, in der über einen Zeitraum von zwei Tagen jeweils mit und ohne Tageslicht ausgewählte Szenarien an wichtigen Positionen messtechnisch erfasst wurden.

Neben der Messung horizontaler und zylindrischer Beleuchtungsstärken wurden auch Leuchtdichte-, sowie Spektralmessungen durchgeführt. Letzteres war insbesondere notwendig, um die gemessenen Beleuchtungsstärken mit einem ebenfalls in situ ermittelten circadianen Wirkfaktor zu bewerten. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Kunstlichtanlage und insbesondere auch deren Steuerung bis auf wenige, zwischenzeitlich optimierte Ausnahmefälle, den gesteigerten Anforderungen der Planung gerecht werden (Beispiel in Abbildung 11).

Die Umsetzung der konsequenten Planung biologisch wirksamer Beleuchtung ist demnach mit den verfügbaren Planungswerkzeugen möglich, wenn auch zeitintensiv. Gegenüber einer klassischen Lichtplanung hat sich in diesem Pilotprojekt der zeitliche Aufwand etwa verdreifacht, insbesondere aber auch um spektral aufgelöste Planungs- und Messdaten zu erheben, einzubinden und zu prüfen.



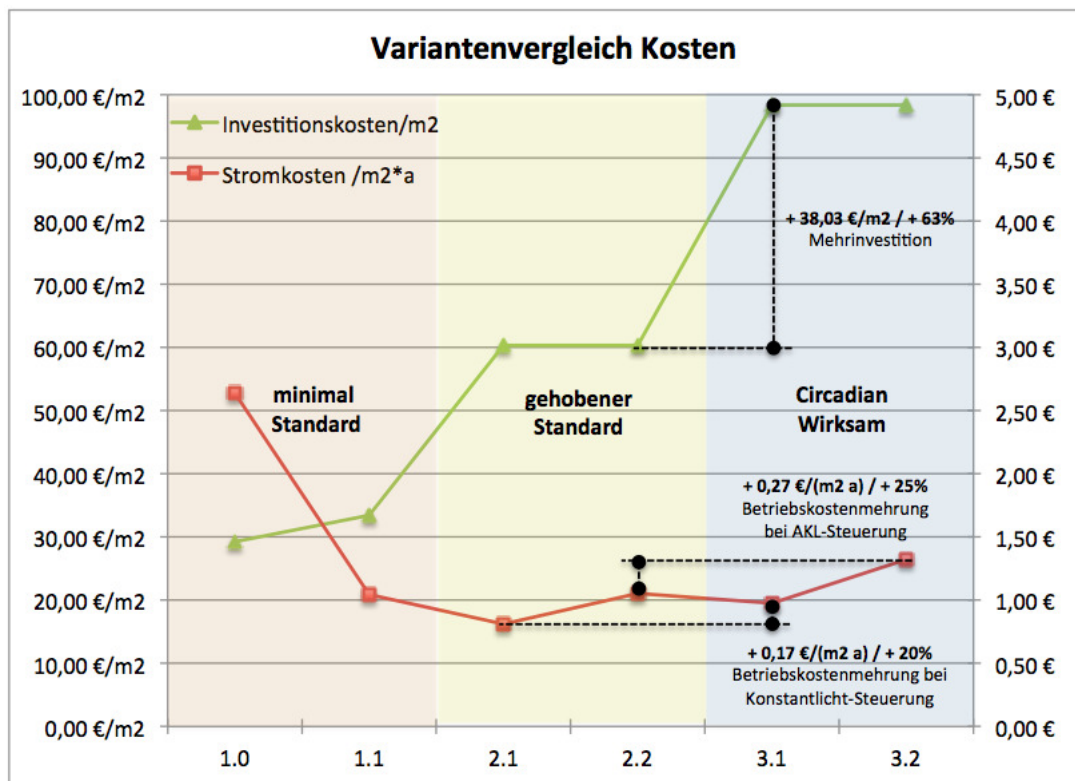
**Abbildung 11 – Auszug aus den Ergebnissen der Inbetriebnahme-Messkampagne über die Beleuchtungsstärken (horizontal und zylindrisch) während eines verkürzten Morgenzyklus. Von großer Bedeutung ist die Überschreitung von 250 Lux melanopisch bewerteter Beleuchtungsstärke auf Augpunkthöhe (dunkelblaue Linie, biologische Wirkschwelle) während der biologisch wirksamen Phase zu Testzwecken von 07:00 bis 08:00 Uhr. Parallel dazu wurde dauerhafte Überschreitung von 500 Lux horizontal (grüne Linie) erfüllt.**

**Wirtschaftlichkeit**

Für biologisch wirksames Licht ist in der Regel immer ein energetischer Mehraufwand gegenüber einer konventionellen Anlage zu erwarten. Dieser Energieverbrauch und die daraus entstehenden Kosten dürfen jedoch nicht ohne weiteres mit den Kennwerten anderer Anlagen verglichen werden. Den Mehrkosten (auch bei der Investition) steht ein erwarteter Mehrwert bei Nutzergesundheit und –Zufriedenheit gegenüber.

Eine Betrachtung ökonomischer und energetischer Aspekte muss diesen Mehraufwand im Vergleich zu klassischen Lösungen in verschiedenen Varianten zeigen. Im Projekt IWL wurden zu diesem Zweck für 6 verschiedene Anlagentypen Invest- und Energiekosten kalkuliert. Es wurden sowohl Leuchtentechnologien als auch Lichtmanagement-Szenarien variiert und in drei Kategorien unterteilt (Minimalstandard, gehobener Standard, biologisch wirksam).

Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 12 dargestellt. Bei der Angabe der Investkosten handelt es sich um marktübliche Preise. Daraus wird deutlich, dass die Errichtung einer biologisch wirksamen Anlage ohne Berücksichtigung positiver Effekte beim Nutzer nur mit einer entsprechenden Förderung realisierbar ist. Sofern sich die Erwartungen in die biologische Lichtwirkung bestätigen und als gesichert gelten dürfen, können die positiven Effekte jedoch auch verstärkt in einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Eingang finden.



**Abbildung 12 – Auszug aus der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Variantenvergleich von Investitions- und Stromkosten für 6 Kunstlichtanlagen<sup>7 8</sup>**

<sup>7</sup> Leuchten-/Lampentechnologie :1.X: Leuchtstofflampen, Direktleuchten; 2.X: LED, Direktleuchten; 3.X LED Direktleuchten, T16 Indirektleuchten

<sup>8</sup> Lichtmanagement: X.0: ohne (nur Handbetrieb); X.1:Konstantlicht; X.2 Adaptive Kunstlichtregelung (siehe Abbildung 10 rechts)

## 5.5. Humanbiologische Begleitforschung

### 5.5.1. Ziel der humanbiologischen Begleituntersuchung

Das Ziel der begleitenden humanbiologischen Forschung war, zu untersuchen, inwieweit Mitarbeiter der Werkstätte im Tagbetrieb von den Effekten dynamischer Beleuchtung (nach den Prinzipien von Human Centric Lighting, HCL) im Vergleich mit normgerechter Standardbeleuchtung profitieren können. Die Datenerhebung fand über einen Zeitraum von zwei Jahren statt. Das Interesse galt besonders potenziellen Auswirkungen des Lichtes auf die körperliche und psychische Befindlichkeit, auf die Schlafqualität und auf die Arbeitszufriedenheit. Aufgrund der Stichprobenbeschaffenheit (mehrheitlich Mitarbeiter mit besonderen Beeinträchtigungen) wurden standardisierte Testverfahren in Teilen speziell an die zu untersuchende Personengruppe adaptiert.

#### Eingesetzte Testverfahren:

In der humanbiologischen Begleituntersuchung kamen folgende Testinstrumente zum Einsatz:

- eine Adaption des Schlafragebogens SF-B/R (Görtelmeyer, 2011),
- eine Adaption des Berner Fragebogens zum Wohlbefinden für Erwachsene (Grob et al., 1991),
- eine Adaption des WHO-5-Wohlbefindens-Index (Bech et al., 2003),
- eine Adaption der Stanford Sleepiness Scale (Hoddes, 1972)
- Munich ChronoType Questionnaire (Roenneberg et al., 2003),
- sowie ein von den Autoren eigens für die Untersuchung entworfener „Täglicher Fragebogen“.

Im zweiten Untersuchungsjahr (nach Feedback über die Testbelastung) konnte die Testbatterie um:

- den Pittsburgh Schlafqualitätsindex (Buysse et al., 1989)
- und die Epworth Schläfrigkeits-Skala (Johns, 1991)

erweitert werden.

### 5.5.2. Untersuchungsdesign

Die Untersuchung war - wie eingangs bereits erwähnt - für eine Durchführungsdauer von zwei Jahren geplant. In diesem zweijährigen Untersuchungszeitraum wurden insgesamt acht Testphasen durchgeführt. So fanden im ersten Jahr der Untersuchung die ersten beiden Testphasen im Dezember 2014 (T1) bzw. Februar/März 2015 (T2) und somit in den sonnenlichtärmeren Wintermonaten statt, gefolgt von zwei weiteren Testphasen im Juni 2015 (T3) bzw. Juli 2015 (T4) in den sonnenlichtintensiveren Sommermonaten.

Die Testphasen im zweiten Untersuchungsjahr (T5, T6, T7, T8) waren analog dazu bzw. identisch platziert. Generell waren die Testphasen in dieser Art terminiert, da im Rahmen dieser Untersuchung auch ein Interesse an den Synergieeffekten zwischen artifizierter dynamischer Beleuchtung sowie natürlichem Sonnenlicht bestand. In den Zeiträumen vom 03.11.2014 bis 30.01.2015, vom 26.06.2015 bis 31.07.2015, vom 01.02.2016 bis 18.03.2016 sowie vom 23.05.2016 bis 24.06.2016 wurde die künstliche dynamische Beleuchtung der Betriebsräume wunschgemäß deaktiviert (siehe Abb. 1). Somit fanden im ersten Untersuchungsjahr die Testphasen T1 und T4 bei statischen Beleuchtungsszenarien sowie die Testphasen T2 und T3 bei dynamischen Beleuchtungsszenarien statt. Im zweiten Jahr der Untersuchung waren die Versuchsbedingungen hinsichtlich der Beleuchtungsbedingungen vertauscht (Crossover-Design), so dass die Testphasen T5 und T8 bei dynamischen Beleuchtungsszenarien stattfanden sowie die Testphasen T6 und T7 bei statischen Beleuchtungsszenarien. Ohne Adjustierung für multiples Testen wurde das Niveau für den alpha-Fehler für signifikante Ergebnisse wurde auf 5% festgelegt.

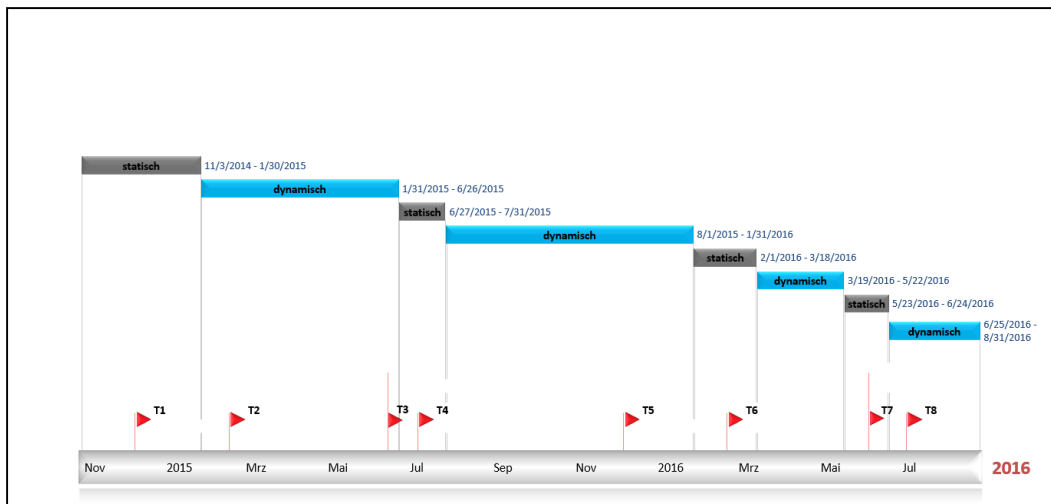


Abbildung 1: Zeitlicher Ablauf der Untersuchung

### 5.5.3. Zusammenfassung der Ergebnisse für das erste Untersuchungsjahr

Beim paarweisen Vergleich des erhobenen Datenmaterials der Testzeitpunkte T1 und T2 (Wintermonate) ergaben sich während der Phase des dynamischen Beleuchtungsszenarios bei der Adaption des Schlaffragebogens SF-B/R auf Itemebene signifikante Veränderungen. So zeigte sich ein verkürztes Zeitintervall zwischen dem Schlafengehen und dem tatsächlichen Einschlafen ( $Z = -2,047; p < .05$ ), des Weiteren wurde seltener über Kopfschmerzen in der Frühe berichtet ( $Z = -2,132; p < .05$ ). Beide Parameter waren signifikant unterschiedlich. Darüber hinaus ergaben sich hinsichtlich des Gesamtscores der Adaption des Screeningverfahrens WHO-5 signifikante Veränderungen, welche auf eine Steigerung des individuell wahrgenommenen Wohlbefindens in der Phase des dynamischen Beleuchtungsszenarios hinweisen (T1:  $mean = 14,56$ , T2:  $mean = 18,00$   $Z = -2,077, p < .05$ ).

Beim paarweisen Vergleich des erhobenen Datenmaterials der Testzeitpunkte T3 und T4 (Sommermonate) zeigte sich nach der Deaktivierung des dynamischen Beleuchtungsszenarios eine Verschlechterung des Skalenwertes „Körperliche Beschwerden“ (aus der Adaption des Berner Fragebogens zum Wohlbefinden für Erwachsene), was eine signifikante Zunahme von körperlichen Symptomen wie beispielsweise Magenschmerzen, Appetitlosigkeit, Schwindel und starken Kopfschmerzen bedeutet (Ergebnisse siehe Tab. 1).

Sommermonate	Testphase 3 (dynamisch)			Testphase 4 (statisch)			Z-Value	P-Value
	M	SD	n	M	SD	n		
<b>Skala KB</b>	3,57	0,38	16	2,93	0,59	12	-2,016	<b>.044*</b>
<b>Skala LF</b>	1,83	0,51	16	2,15	0,63	12	-1,364	.172

**Tabelle 1: Adaption des Berner Fragebogens zum Wohlbefinden für Erwachsene: Deskriptive Statistik und paarweiser Vergleich der Skalenwerte KB/LF aus T3 und T4**

#### 5.5.4. Zusammenfassung der Ergebnisse für das zweite Untersuchungsjahr

Beim paarweisen Vergleich des erhobenen Datenmaterials der Testzeitpunkte T5 und T6 (Wintermonate) ergab sich während der Phase des dynamischen Beleuchtungsszenarios bei der Adaption des Schlaffragebogens SF-B/R auf Itemebene eine signifikante Veränderung dergestalt, dass die Arbeitstätigkeit im Zeitraum der letzten zwei Wochen vor der Testdurchführung als signifikant weniger belastend erlebt wurde ( $Z = -2,456$ ;  $p < .05$ ). Darüber hinaus zeigte sich nach der Deaktivierung des dynamischen Beleuchtungsszenarios bei der Adaption des Berner Fragebogens zum Wohlbefinden für Erwachsene zum Testzeitpunkt T6 (verglichen mit T5) ein erneut reduzierterer Skalenwert „Körperliche Beschwerden“, was wieder - wie im Vorjahr - mit einer Zunahme von körperlichen Symptomen wie beispielsweise Magenschmerzen, Appetitlosigkeit, Schwindel und starken Kopfschmerzen gleichzusetzen ist (Ergebnisse siehe Tab. 2).

Wintermonate	Testphase 5 (dynamisch)			Testphase 6 (statisch)			Z-Value	P-Value
	M	SD	n	M	SD	n		
<b>Skala KB</b>	3,69	0,24	12	3,44	0,38	14	-2,120	<b>0.34*</b>
<b>Skala LF</b>	1,92	0,62	12	1,94	0,63	13	-0,106	.915

**Tabelle 2: Adaption des Berner Fragebogens zum Wohlbefinden für Erwachsene: Deskriptive Statistik und paarweiser Vergleich der Skalenwerte KB/LF aus T1 und T2**



Da die kognitiven Fähigkeiten der Untersuchungsteilnehmer durch die Erfahrungen des Testleiters bei der Durchführung der Testungen im ersten Untersuchungsjahr nun besser beurteilt werden konnten und den Teilnehmern aus dieser Perspektive weitere Verfahren (ohne eine zu erwartende Überforderung) zugemutet werden konnten, wurde die Testbatterie bei den Testzeitpunkten T5 bis T8 mit zwei weiteren Verfahren ergänzt: den Pittsburgh Schlafqualitätsindex sowie die Epworth Schläfrigkeitsskala. Die Motivation für diese Erweiterung rührte daher, dass der eingesetzte Schlaffragebogen SF-B/R - aus Gründen der Zumutbarkeit für die Studienteilnehmer - nur auf eine Itemauswahl beschränkt war und der Vergleich der Daten somit nicht auf Skalenebene, sondern nur auf Itemebene möglich war. Diesem Manko sollte die Erweiterung der Testbatterie um zwei weitere, in der Schlafforschung gängige und in vollem Itemumfang einzusetzende und auf Skalenebene auswertbare Testverfahren entgegenwirken. Zwar zeigte die statistische Analyse der Testergebnisse der ESS weder beim Vergleich des Datenmaterials der Wintermonate (T5 und T6) noch des Datenmaterials der Sommermonate (T7 und T8) signifikante Veränderungen. Jedoch ergaben sich beim paarweisen Vergleich des mit dem PSQI erhobenen Datenmaterials der Testzeitpunkte T5 und T6 (Wintermonate) zwei signifikante Veränderungen: Erstens zeigte sich zum Zeitpunkt des statischen Beleuchtungsszenarios (T6) eine höhere Ausprägung des Gesamtscores dieses Testverfahrens, was mit einer Verschlechterung der allgemeinen Schlafqualität gleichzusetzen ist (T5: mean = 3,71; T6: mean = 5,23;  $Z = -2,107$   $p < .05$ ). Zum Zweiten war zum Zeitpunkt T6 bei statischen Beleuchtungsbedingungen eine signifikante Zunahme der Ausprägung der Werte der Komponentenskala „Schlafstörungen“ (T5: mean = 0,93; T6: mean = 1,23;  $Z = -2,000$ ;  $p < .05$ ) zu beobachten, was ebenso auf eine Beeinträchtigung der Schlafqualität bei Wegfall der Exposition der dynamischen Beleuchtung hindeutet.

Ferner zeigten sich im zweiten Untersuchungsjahr bei der Analyse des Datenmaterials der von den Probanden täglich und selbstständig auszufüllenden Fragebögen statistisch signifikante Veränderungen: Beim nicht-parametrischen Vergleich der Item-Mittelwerte der Testphasen 5 und 6 zeigte sich für das Item D (welches die Stanford Sleepiness Scale verkörpert) eine statistisch bedeutsame Mittelwerterhöhung, was für eine Zunahme der Tagesschläfrigkeit bzw. eine Reduktion der Wachheit zum Zeitpunkt des Arbeitendes um 15:45 Uhr in der Untersuchungskondition mit statischer Beleuchtung spricht ( $Z = -2,090$ ;  $p < .05$ ). Überdies zeigte der Mittelwertvergleich des erhobenen Datenmaterials aus den Testphasen 7 und 8 für das von den Autoren dieser Untersuchung selbstformulierte Item C1 („Wie bist Du mit Deiner heutigen Arbeitsleistung zufrieden?“) unter der Bedingung der dynamischen Beleuchtung einen statistisch signifikanten Mittelwertrückgang, was mit einer Zunahme der subjektiven Zufriedenheit mit der eigenen Arbeitsleistung gleichzusetzen ist ( $Z = -2,120$ ;  $p < .05$ ).

### 5.5.5. Gesamtbewertung:

In der Gesamtschau zeigen sich im Rahmen der Auswertung des Datenmaterials sowohl im ersten wie auch im zweiten Untersuchungsjahr statistisch signifikante Veränderungen, die auf positive Auswirkungen des dynamischen Beleuchtungsszenarios gegenüber normgerechter Standardbeleuchtung auf die zu untersuchenden Bereiche hinweisen. Besonders hervorzuheben ist die Tatsache, dass sich beim Berner Fragebogen zum Wohlbefinden für Erwachsene (Grob et al., 1995) – wie in Abbildung 2 grafisch dargestellt - sowohl im ersten Untersuchungsjahr als auch im zweiten Jahr der Untersuchung während der Deaktivierung der dynamischen Beleuchtung ein Rückgang des Skalenwertes „Körperliche Beschwerden“ zeigte, welcher mit einer Zunahme von körperlichen Beschwerden ohne circadian unterstützende Beleuchtung gleichzusetzen ist. Insofern spricht dies sehr für die positiven Auswirkungen des HCL Beleuchtungsszenarios auf die Reduktion von körperlichen Symptomen wie beispielsweise Magenschmerzen, Appetitlosigkeit, Schwindel und starken Kopfschmerzen.

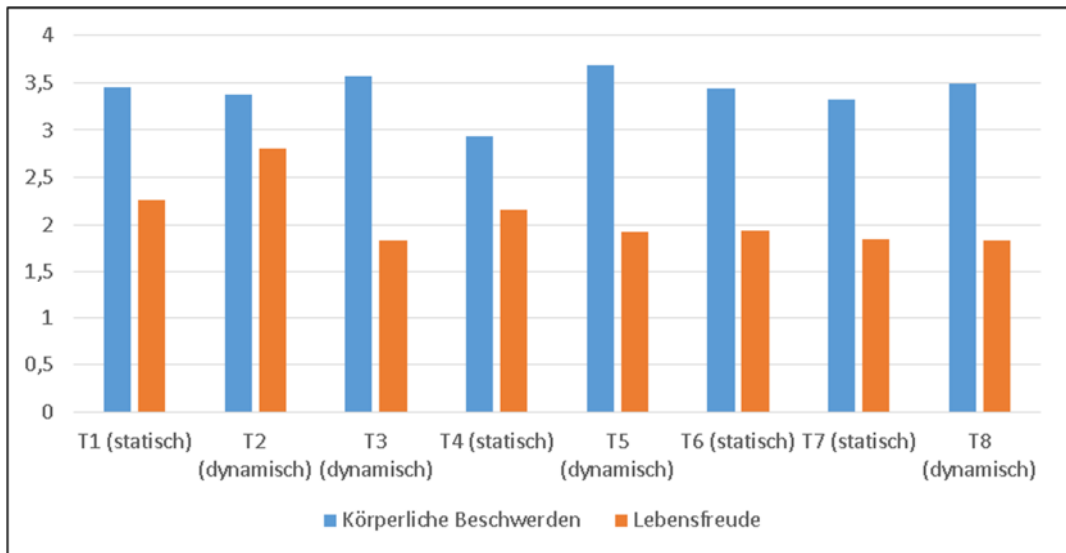


Abbildung 2: Skalenwerte der Adaption des Berner Fragebogens zum Wohlbefinden f. Erwachsene

Generell ist bei der Bewertung der Ergebnisse allerdings zu berücksichtigen, dass es sich bei dieser Untersuchung um eine kleine Stichprobe handelt (Stichprobengröße zum Studienbeginn im Herbst 2014:  $n = 22$ ), die durch Ausfälle zu den einzelnen Testzeitpunkten zahlenmäßig noch weiter reduziert war, so dass die Aussagekraft der Ergebnisse unter diesem Vorbehalt betrachtet werden muss.

Nachdem die Betriebsräume, in denen die befragten Mitarbeiter ihre Arbeit verrichten, so konstruiert worden sind, um auch das natürliche Sonnenlicht optimal nutzen zu können, war mit „Synergieeffekten“ zwischen natürlichem Sonnenlicht und der dynamischen Beleuchtungsanlage zu rechnen. Die Beleuchtungsanlage sollte daher in den sonnenlichtärmeren Wintermonaten einen höheren Anteil an der Gesamtzusammensetzung des Hallenlichtes haben, welchem die Mitarbeiter während ihrer Arbeit ausgesetzt sind.

Wenn positive Effekte auf die zu untersuchenden Variablen überhaupt messbar sind, sollten diese Effekte mehrheitlich in den Wintermonaten auftreten. Die These eines höheren Effektes der dynamischen Beleuchtung in den dunklen Monaten bzw. möglicher „Synergieeffekte“ kann durch die vorliegenden Ergebnisse gestützt werden.

Trotz der schwierigen Randbedingungen konnte sich in dieser Untersuchung deutlich ein positiver Effekt des HCL-Beleuchtungsszenarios auf die Belegschaft ableiten.

Ein ausführlicher Bericht über die Untersuchungen des Zweijahreszeitraums mit einer detaillierten Ergebnisdarstellung befindet sich im Anhang.

## **5.6 Betrieb einer biodynamisch wirksamen Kunstlichtanlage**

Die Ergebnisse dieses Bearbeitungspunktes werden in Kapitel 5 des 3Ipi Schlussberichts zum qualifizierten Energiemonitoring dargestellt. Dieser ist in Anhang A dem DBU-Bericht beiliegend.

## **5.7 Qualifiziertes Energiemonitoring**

Die Ergebnisse dieses Bearbeitungspunktes werden in Kapitel 3 und 4 des 3Ipi Schlussberichts zum qualifizierten Energiemonitoring dargestellt. Dieser ist in Anhang A dem DBU-Bericht beiliegend.