

Konzeptionierung eines optimierten Aufständersystems für
Photovoltaik-Anlagen auf Flachdächern

Diplomarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom - Ingenieur (FH)

In Zusammenarbeit mit:



Verfasser:

Name: Matthias Halaburda
Matr.Nr.: 1085666

Betreuung:

Erstbetreuung: Prof. Dr.-Ing. Hans-Hermann Sass
Zweitbetreuung: Dipl. Ing. Stefan Von der Rente

I Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Ziel der Arbeit.....	2
1.1.1	Anpassung der staatlichen Förderung.....	2
1.1.2	Potentiale für PV-Systeme auf Flachdächern.....	3
1.1.3	Bedarf an angepassten Trägersystemen.....	4
1.1.4	Ziel der Arbeit und methodisches Vorgehen.....	4
2	Theoretische Grundlagen	7
2.1	Flachdächer.....	7
2.1.2	Art der Nutzung.....	8
2.1.3	Dachneigung.....	10
2.1.4	Dachentwässerung.....	11
2.1.5	Lage der Wärmedämmung.....	13
2.1.6	Konstruktionskonzepte der Tragschicht.....	14
2.1.7	Bauphysikalische Schichten	16
2.2	Photovoltaikanlage	22
2.2.1	Einsatzbereiche von PV - Anlagen	23
2.2.2	Aufdach-Systeme für Flachdächer	26
2.2.3	Aufständigung	29
2.3	Modulabschattung	33
2.4	Baurechtliche Einordnung von PV - Anlagen.....	34
3	Marktanalyse	40
3.1	Kriterien für die Analyse.....	41
3.2	Systembeschreibung	42
3.3	Übersicht der Systemdaten	44
3.4	Auswertung der Systemdaten.....	45
4	Konstruktionsentwurf.....	47
4.1	Systemanforderungen	47
4.2	Entscheidungsgrundlagen	47
4.2.1	Wahl des Werkstoffes/Fertigungsverfahrens.....	47
4.2.2	Modulneigungswinkel	49
4.2.3	Modulabmessungen	51
4.2.4	Modul-Wechselrichter von Enecsys.....	52

4.2.5	Temperatureinfluss auf Module	53
4.2.6	Gewährleistung des Wasserablaufs	53
4.3	Systembeschreibung	54
4.3.1	Bauteile	56
4.4	Optimierung des Entwurfs	59
4.4.1	Gesamtdarstellung	62
4.4.2	Detaildarstellung	63
5	Statische Bemessung	64
5.1	Aufgabenstellung	64
5.2	Vorbemerkungen	64
5.3	Konstruktionsbeschreibung	65
5.4	Systemabmessungen	66
5.5	Werkstoffkennwerte	66
5.6	Querschnittkennwerte	66
5.7	Positionsplan	67
5.8	Belastung	67
5.8.1	Lastfälle	67
5.8.2	Lastfallkombinationen	70
5.9	Schnittgrößen	71
5.10	Auflagerreaktionen	71
5.11	Berechnung und Nachweise	72
5.11.1	POS 01 – Fußprofil	72
5.11.2	POS 02 – Stützprofil	76
5.11.3	POS 03 – Koppelprofil	79
6	Zusammenfassung und Ausblick	82
6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	82
6.2	Ausblick	85

Anhang

- A Konstruktionszeichnungen
 - A1 Positionsplan
 - A2 POS 01 – Fußprofil
 - A3 POS 02 – Stützprofil; POS 03 – Koppelprofil
 - A4 POS 04 – Modulaufleger oben; POS 05 – Modulaufleger unten
 - A5 POS 06 – Modulendklemme; POS 07 – Modulmittelklemme
 - A6 POS 08 – Windleitblech; POS 09 Auflagerplatte
- B Materialliste
- C Querschnittskennwerte
- D Schnittgrößen
- E Stabilitätsnachweise
- F Abschlussbericht Mechanische Lastprüfung

II Abbildungsverzeichnis

Bild 2.1:	Unterscheidung von Flachdächern nach der Dachneigung	11
Bild 2.2:	Arten der Entwässerung von Flachdächern	12
Bild 2.3:	Unterscheidung des Dachaufbaus nach der Lage der Dämmung	14
Bild 2.4:	Modulares Prinzip einer PV-Anlage	22
Bild 2.5:	Einsatzbereiche von PV – Anlagen.....	25
Bild 2.6:	Aufdach: Elemente von Aufständersystemen	26
Bild 2.7:	Montagevarianten auf Flachdächern (Photovoltaik 04/2009).....	27
Bild 2.8:	Trägerprofilschienen für Module (Div. Hersteller)	29
Bild 2.9:	Winkelstütze für a) Foliendächer und b) Profiblechdächer.....	30
Bild 2.10:	Wannen-System (ConSole von Renusol)	30
Bild 2.11:	Sockelsysteme	31
Bild 2.12:	End- und Mittelklemmen für PV-Module (DGS, 2008)	31
Bild 2.13:	Klemmleisten für PV-Module ([7])	32
Bild 2.14:	Einlegesystem (Phoenix-Solar).....	32
Bild 2.15:	Geometrische Verhältnisse bei aufgeständerten Modulen	33
Bild 2.16:	Abschattungswinkel in Abhängigkeit vom Breitengrad	34
Bild 2.17:	Rechtliche Anforderungen beim Bau von PV-Anlagen [16]	35
Bild 4.1:	Aufbau der Simulation zur Ertragsermittlung mit PV*Sol expert	50
Bild 4.2:	Ertrag in Abhängigkeit vom Modulneigungswinkel.....	51
Bild 4.3:	Modulwechselrichter der Firma „enecsys micro-inverters“.....	53
Bild 4.4:	Stellmöglichkeiten des MNW	55
Bild 4.5:	Ineinanderklappen der Winkelstütze	55
Bild 4.6:	Gesamtdarstellung und Bauteilbenennung des Entwurfs	58
Bild 4.7:	Gegenüberstellung der Winkelstützen	59
Bild 4.8:	MA oben (links) und des MA unten (rechts).....	61
Bild 4.9:	Gesamtdarstellung des optimierten Entwurfs	62
Bild 4.10:	Detaildarstellung des optimierten Entwurfes.....	63
Bild 5.1:	Lastfall Eigengewicht	67
Bild 5.2:	Lastfall Schnee nach DIN 1055-5 [VII]	68
Bild 5.3:	Lastfall Wind nach EN 1991-1-4	69
Bild 5.4:	Maximale Auflagerkraft in POS 01	75
Bild 5.5:	Anschlussbereich POS 02 zu POS 04	77
Bild 5.6:	Anschlussbereich POS 01 zu POS 03	80

Bild 6.1:	Entwicklungsphasen von Produkten	85
-----------	--	----

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Übersicht der Klassifikation von Flachdächern	8
Tabelle 2.2:	Bezeichnungen von Dämmstoffen	18
Tabelle 2.3:	Festigkeitsverhalten von Wärmedämmstoffen	19
Tabelle 2.4:	Unterteilung von Bauprodukten nach der LBO in der BRL	37
Tabelle 3.1:	Beschreibung der Funktionsweise der 10 Montagesysteme	42
Tabelle 3.2:	Zusammenstellung der Ergebnisse aus der Marktanalyse	44
Tabelle 4.1:	Abmessungen der Ningbo Module und anderer Modulhersteller	52
Tabelle 5.1:	Übersicht der Berechnungsgrundlagen	65
Tabelle 5.2:	Systemabmessungen in Abhängigkeit vom MNW	66
Tabelle 5.3:	Werkstoffkennwerte	66
Tabelle 5.4:	Charakteristische Werte für Schneelasten	68
Tabelle 5.5:	Windlasten in Abhängigkeit vom Neigungswinkel	69
Tabelle 5.6:	Zusammenstellung der Auflagerreaktionen	71

IV Nomenklatur

Kurzzeichen	Beschreibung
α	Beiwert zur Bestimmung der Beanspruchbarkeit auf Lochleibung
σ	Normalspannungen
τ	Schubspannungen
μ_i	Formbeiwert für Schneelasten
A	Fläche des vollen Querschnitts
A_1	Restquerschnitt
A_{Netto}	Fläche des geschwächten Querschnittes
A_{ref}	Bezugsfläche
A_{Sch}	Querschnittsfläche einer Schraube
A_{Vd}, A_{Hd}, B_{Vd}	Bemessungsgrößen der Auflagerreaktionen
A_{Δ}	Fläche der Querschnittsschwächungen
b_{WLB}	Breite des Windleitbleches
C_f, C_{pe}	Aerodynamischer Kraftbeiwert
d	Indizes für ein Bemessungswert
d	Schraubendurchmesser
d_0	Lochdurchmesser
d_M	Abstand der Modulreihen
E	Elastizitätsmodul
e	Abstand
e_1	Loch-Rand-Abstand in Krafrichtung
e_2	Loch-Rand-Abstand rechtwinklig zur Krafrichtung
f	Flächennutzungsgrad
$f_{0,2k}$	Charakteristische Streckgrenze bei 0,2 % Dehnung für Aluminium
$F_{b,Rd}$	Beanspruchbarkeit auf Lochleibung
F_{tj}	Reibungskraft infolge Wind
$f_{u,k}$	Charakteristische Zugfestigkeit von Aluminium
$F_{v,d}$	Bemessungslast einer Schraube im Gebrauchszustand
$F_{v,Rd}$	Beanspruchbarkeit einer Schraube auf Abscheren
G	Schubmodul
g_{AL}	Spezifisches Gewicht von Aluminium
g_k	Ständige Einwirkung Eigengewicht
$g_{k,M}$	Eigengewicht des Moduls

h_M	Höhe der aufgeständerten Module rechtwinklig zur Aufstellfläche
k	Indizes für eine charakteristische Größe
l_{KP}	Länge des Koppelprofils
l_M, b_M, h_M	Modulabmessungen Längr/Breite/Höhe
l_{WS}	Länge des Winkelstütze
M_d	Bemessungswert infolge einer Biegebeanspruchung
N_d	Bemessungswert infolge einer Einwirkung längs zum Querschnitt
p_1	Lochabstand in Krafrichtung
$q_{(HG)}$	Geschwindigkeitsdruck der einer Windgeschwindigkeit zugeordnet ist in Abhängigkeit
Q_d	Bemessungswert infolge einer Einwirkung quer zum Querschnitt
$s_{i,k}$	Charakteristischer Wert der Schneelast auf dem Dach
s_k	Charakteristischer Wert der Schneelast auf dem Boden
s_k	Veränderliche Einwirkung Schnee
t	Blechstärke
t_{max}	Maximal zulässige Bauteildicke
w_e	Winddruck der auf die Außenfläche eines Bauteils wirkt
$w_{k,li}$	Veränderliche Einwirkung Wind von links (in Richtung Modul)
$w_{k,re}$	Veränderliche Einwirkung Wind von rechts (in Richtung Windleitblech)
α_1	Neigungswinkel des Moduls
α_2	Neigungswinkel des Windleitbleches
α_F	Winkel der Lastausbreitung
γ_G	Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen
γ_i	Abschattungswinkel
γ_{M1}	Teilsicherheitsbeiwert für dem Widerstand bei Bauteilen
γ_{M2}	Teilsicherheitsbeiwert für dem Widerstand bei Verbindungen
γ_Q	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen
Φ	Dachneigung
$\Psi_{0,w}$	Beiwert für Kombinationswerte veränderlicher Einwirkungen

V Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
BauPG	Bauproduktgesetz
BG	Breitengrad
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
BRL	Bauregelliste
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung
EEG	Erneuerbaren Energien Gesetz
EPIA	Europäischer Photovoltaik - Industrieverband
FP	Fußprofil
GG	Grundgesetz
Gl.	Gleichung
GS	Geprüfte Sicherheit
GW	Gigawatt
Kap.	Kapitel
KP	Koppelprofil
LBO	Landesbauordnung
LF	Lastfall
LK	Lastfallkombination
MA	Modulaufleger
MBO	Musterbauordnung
MK	Modulklemme
MNW	Modulneigungswinkel
MTP	Modulträgerprofil
PL	Punktlast
PV	Photovoltaik
SP	Stützprofil
StGB	Strafgesetzbuch
VDE	Verband der Elektrotechnik
WS	Winkelstütze

1 Einleitung

Der Klimawandel mit all seinen negativen Folgen für Mensch und Umwelt ist keine Prognose, sondern findet bereits statt. Ursächlich hierfür sind vor allem die sogenannten Treibhausgase, allen voran das Kohlendioxid (CO₂), das hauptsächlich bei Verbrennungsprozessen unter massivem Einsatz fossiler Brennstoffe wie Kohle, Erdgas und Erdöl im produzierenden Industrie und bei der Stromerzeugung, aber auch im Transportwesen und in privaten Haushalten freigesetzt wird. Die Industrieländer sind für den überwiegenden Teil der Treibhausgas-Emissionen verantwortlich, aber in zunehmendem Maße auch Schwellenländer wie China, Indien und Brasilien, die im Zuge der rasanten Industrialisierung die gängigen Technologien der Energieerzeugung übernommen haben.

Nachhaltige Entwicklung, Klimaschutz und die Substitution begrenzter fossiler Energieträgern durch eine verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien stehen daher hoch in der Priorität politischer Diskussionen und der technologisch-wirtschaftlichen Entwicklung. Tatsächlich ist der deutliche Anstieg der erneuerbaren Energien (Wind, Biomasse, Wasser, Photovoltaik (PV) und Geothermie) bei der Stromerzeugung im Trend und weist mittlerweile schon einen Anteil von 16,3 Prozent am deutschen Stromverbrauch auf.

Bedingt durch die hohe staatliche Förderung entwickelte sich PV-Branche in den vergangenen Jahren besonders rasant und konnte sich nahezu vollständig von den Auswirkungen der weltweiten Wirtschaftskrise in diesem Jahr entziehen. Mit einem Zubau von rund 3,8 GW in 2009 (Quelle: EPIA-Europäischer Photovoltaik-Verband) lag der Anteil von PV-Strom an der erzeugten inländischen Strommenge aber immer nur bei etwas über einem Prozent. Deutlich vor der Photovoltaik rangieren weiterhin die Windenergie (6,6 Prozent), die Biomasse (5,2 Prozent) und die Wasserkraft (3,3 Prozent), die den Hauptanteil der erneuerbaren Energien bei der Stromerzeugung ausmachen.

In den nächsten Jahren erwartet man für Deutschland ein weiteres Wachstum bei PV-Anlagen (Goldman Sachs prognostiziert 6,5-7,5 GW PV-Zubau, Solarbuzz rechnet mit 8 GW), obwohl der Markt stärkeren Nachfrageschwankungen auf Grund der vorgenommenen Kürzungen bei der Einspeisungsvergütung unterliegen dürfte. Allerdings könnte der Subventionsabbau durch steigende Effizienz und dadurch sinkende Modulpreise und verminderten Tarife ausgeglichen werden.

Auch im internationalen Maßstab erwartet man ein starkes Wachstum des PV-Marktes. Laut Goldman Sachs soll der globale Zubau in 2010 etwa 13 GW aus-

machen, Solarbuzz rechnet sogar mit 15,2 GW neu installierter PV-Leistung. Dies wäre eine Verdopplung im Vergleich zum Jahre 2009. Zurückzuführen sei das starke Wachstum auf den Nachfrageboom vor allem in Europa, aber auch in den USA, Japan und China.

Wenn die Nutzung von Solar-Strom und die Photovoltaik auf diesem Wachstumspfad bleiben, könnte sich die Branche in absehbarer Zeit aus ihrer bisherigen Nischenposition in eine relevante Größenordnung von vier bis fünf Prozent am deutschen Stromverbrauch entwickeln.

1.1 Problemstellung und Ziel der Arbeit

1.1.1 Anpassung der staatlichen Förderung

Die deutschen Produzenten von PV-Systemen haben in den vergangenen Jahren besonders von der Einführung des Erneuerbare-Energie-Gesetzes (EEG) im April 2000 profitiert und machten Deutschland mit dem erheblichen Zubau im vergangenen Jahr sogar zum sogenannten „PV-Weltmeister“.

Das Gesetz in seiner damaligen Fassung machte Betreiber öffentlicher Netze zur Auflage, den Strom aus erneuerbaren Energien ungeachtet ihres Bedarfs abzunehmen und entsprechend zu vergüten. Die Höhe der Vergütung war dabei sowohl auf die Kapazität des PV-Systems als auch auf die Örtlichkeit der Installation von PV-Anlagen auf Gebäuden oder auf Freiflächen ausgerichtet. Aufgrund der im Gesetz vorgesehenen Degression der Einspeisevergütung sollte sich der PV-Markt in Deutschland langfristig konsolidieren.

Mittlerweile hat die weltweite Massenproduktion von PV-Modulen zu erheblichen Preissenkungen geführt [3]. Nach Ansicht des Gesetzgebers würde dies bei Aufrechterhaltung der bisherigen Vergütungsregeln zu einer „Überförderung“ des Solarstroms und zu Wettbewerbsverzerrungen im Energieversorgungsbereich führen. Daher verabschiedete Bundesregierung die Senkung der Photovoltaik-Einspeisevergütung für 2010. Nach der jetzt gültigen Fassung wurde die Förderung wie folgt angepasst:

- ♦ Für Dachanlagen wird die Vergütung ab 1.7.2010 einmalig um 13 Prozent abgesenkt. Hinzu kommt eine weitere Kürzung um drei Prozent zum 01.10.2010 und zum Jahresende eine weitere ohnehin vorgesehene Absenkung um neun Prozent.

- ◆ Die Vergütung für Anlagen auf Ackerflächen ab dem 1. Juli 2010 entfällt, um zu vermeiden, dass landwirtschaftlich nutzbare Flächen für Solaranlagen verbraucht werden.
- ◆ Bei anderen Freiflächen beträgt die Absenkung 15 Prozent, bei Flächen ehemaliger wirtschaftlicher und militärischer Nutzung 11 Prozent. Im Gegenzug werden andere vorbelastete Flächen in die Förderung neu aufgenommen. Dazu zählen Industrie- und Gewerbegebiete sowie Seitenstreifen von Autobahnen und Schienenwegen.
- ◆ Der Anreiz für den Eigenverbrauch wird erhöht, wenn man den gewonnenen Strom nicht einspeist, sondern selbst verbraucht. Die Anlagengröße, die bisher auf 30 KW begrenzt war, wurde auf 500 KW hochgesetzt, so dass nun auch Großanlagen in den Genuss der Förderung kommen.
- ◆ Degression wird neugestaltet: Bei einem Zubau von 2,5 bis 3,5 GW bleibt es bei einer Degression von neun Prozent. Wird diese Grenze überschritten, wird stärker gekürzt. Bleibt der Zubau dagegen unter diesem Ziel, fällt die Minderung niedriger aus.

Mit dieser Flexibilisierung soll dem Marktgeschehen besser Rechnung getragen werden. Wenn viele Anlagen gebaut werden, ginge diese Entwicklung mit sinkenden Preisen einher. Dann könnte auch die Förderung entsprechend vermindert werden.

1.1.2 Potentiale für PV-Systeme auf Flachdächern

Diese Anpassung der öffentlichen Förderung hat natürlich erhebliche Auswirkungen für die Standortbestimmung, die Dimensionierung und Systemgestaltung von PV-Anlagen in der Zukunft. So findet eine gewisse Marktbereinigung statt, in dem die neue Einspeisevergütung einerseits die Realisierung von Freiflächenanlagen erheblich einschränkt, andererseits aber gleichzeitig deutlich bessere Chancen für die Realisierung gebäudegebundene Solarsysteme bietet, die auch dem Eigenverbrauch der erzeugten Energie dienen. Davon werden nun insbesondere auch Betreiber größerer PV-Anlagen profitieren, die damit ihren eigenen Strom z.B. auf Industriehallendächern, überdachten Betriebsparkplätzen, Sportanlagen oder anderen Flachdächern sowohl im Gebäudebestand als auch beim Neubau erzeugen wollen.

Heute ist nur ein Bruchteil der großen Industrie- und Gewerbedächer, aber auch der öffentlichen Gebäude (Verwaltung, Schulen, Krankenhäuser etc.) mit Solarstromanlagen belegt. Doch mit fallenden Modulpreisen und weiterentwickelter Technik wird sich daraus ein zukunftssträchtiges Geschäftsmodell für die Installation von Photovoltaik in Kombination mit Dachsanierungen ergeben. Eine 2010 von Parabel-Solar in Auftrag gegebene und auf der Fachmesse Intersolar 2010 präsentierte Flachdachstudie der EPIA zeigt, wie groß der Flachdachbestand sowie das Flachdachpotential in Deutschland und Europa sind. Der Studie zufolge beträgt der Bestand 1,5 Mrd. m². In Europa stehen 8 Mrd. m² zur Verfügung. Das Potential durch Neubauten beträgt in Deutschland 28,5 Mio. m²/Jahr in Europa sind es 150 Mio. m²/Jahr. Diese Zahlen zeigen, dass in diesem Bereich auch in Zukunft eine große Anzahl von Flächen zur Verfügung stehen wird.

1.1.3 Bedarf an angepassten Trägersystemen

Die Vorteile der Montage von PV-Anlagen auf Flachdächern liegen auf der Hand, zumindest auf den ersten Blick: Die Installation ist im Vergleich zur Freifläche einfach und die Projekte können bei vergleichsweise niedrigen Installationskosten in kurzer Zeit realisiert werden.

Um dieses Potenzial tatsächlich zu erschließen, müssen jedoch technisch recht anspruchsvolle Vorkehrungen getroffen werden. Denn die typischen Flachdächer von Industrie- und Gewerbebauten sind aus Kostengründen meist nur für eine geringe Tragfähigkeit ausgelegt und verkraften daher keine großen oder zusätzlichen Auflasten. Auch stellt die Dachabdichtung von Flachdächern bei nachträglichen Installationen mit Dachanbindung von PV-Anlagen ein erhöhtes Risiko dar, da Durchfeuchtungen der Dachhaut an den Befestigungspunkten auftreten können. Während der Betriebsphase der Anlage würden Reparaturarbeiten am Dach erforderlich sein und führen mitunter zu Ausfallzeiten bei der Stromproduktion.

Die Einbindung einer PV-Anlage auf einem Gebäudedach ist also immer mit einer angepassten Trägerkonstruktion, unter Berücksichtigung bautechnischer Eigenschaften verbunden, und es ist genau zu prüfen, welches Montagesystem die Anforderungen optimal erfüllt.

1.1.4 Ziel der Arbeit und methodisches Vorgehen

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen SIG-Solar ein Montagesystem für gerahmte PV-Module auf Flachdächern entwickelt. Dabei soll eine optimale Lösung für ein Aufständersystem, orientiert an den gängigen Flachdachformen, konstruktiv entworfen werden, um eine effiziente, standsichere, last- und wartungsarme und damit kostengünstige Realisierung von aufgeständerten PV-Modulen zu ermöglichen.

Dazu werden in einem ersten Schritt die theoretischen Grundlagen erarbeitet, indem die im anzutreffenden Konstruktionsformen von Flachdächern analysiert und hinsichtlich ihrer Nutzungsarten und bauphysikalischen Eigenschaften beschrieben werden. Weiterhin werden die Einsatzbereiche von PV-Anlagen und deren Möglichkeiten der Aufständersung für diesen Dachtypus und ihre baurechtlichen Einordnung untersucht.

In einem zweiten Schritt wird ein Überblick über die bereits marktgängigen Montagesysteme im Bereich der Flachdachkonstruktionen gegeben. Dabei konzentriert sich die Marktuntersuchung, die mit Hilfe eines standardisierten Fragebogens bei ausgewählten Systemherstellern durchgeführt wurde, auf windoptimierte, befestigungslose Montagesysteme.

Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen und den Ergebnissen der Marktanalyse wurde ein erster Konstruktionsentwurf für ein Aufständersystem erarbeitet, der nach eingehender Prüfung und Diskussion mit SIG-Solar angepasst und optimiert wurde.

Der Nachweis der Systemstatik für die Trägerkonstruktion wird auf der Basis der geltenden Normung geführt.

In einem abschließenden Kapitel werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf die weitere Entwicklung von Trägerkonstruktionen für PV-Anlagen auf Flachdächern gegeben.

2 Theoretische Grundlagen

Zur Erarbeitung von Kriterien für die Konzeptionierung des Aufständersystems ist eine Auseinandersetzung mit den konstruktiven und bauphysikalischen Eigenschaften von Flachdächern notwendig. Mittels einer Klassifikation von Flachdächern werden die relevanten Unterscheidungsmerkmale dargestellt.

Durch eine Zusammenstellung aller Einsatzbereiche von PV-Anlagen wird gezeigt, wie vielseitig einsetzbar diese Technologie ist. Der Schwerpunkt wird jedoch auf die Komponenten von aufgeständerten Flachdachsystemen gelegt.

Eine baurechtliche Auseinandersetzung zeigt, wie aufgeständerte PV-Anlagen von Gesetzgeber eingeordnet sind. Diese Ausarbeitung verdeutlicht welche Pflichten der Errichter einer PV-Anlage auf einem Flachdach zu erfüllen hat.

2.1 Flachdächer

Allgemein

Dächer bilden den obersten vertikalen Raumabschluss. Dabei übernehmen sie aus bauphysikalischer und aus baustatischer Sicht den Witterungsschutz sowie den Lastabtrag. Der Witterungsschutz wird von einem Flächenpaket, bestehend aus einzelnen Werkstoffschichten, gewährleistet. Dieses Paket ist jedoch nicht in der Lage sich selbst sowie zusätzliche Lasten zu tragen, es benötigt eine Tragschicht (Tragwerk). Diese übernimmt den Lastabtrag und ist im Regelfall unterhalb der bauphysikalischen Schichten angeordnet.

Klassifikationen

Die baukonstruktiven (Tragschicht) und bauphysikalischen Elemente, die den Aufbau und Tragstruktur von Flachdächern bestimmen, können vielfältig kombiniert werden. Selbst bei typisierten Gebäudearten gibt es, in Abhängigkeit vom Entwurf, grundlegende Unterschiede. Hier wird der Versuch unternommen, die wesentlich relevanten Elemente zu definieren. Die Tabelle 2.1 gibt eine Übersicht der Klassifikationen. Im weiteren Verlauf werden die einzelnen Klassifikationen näher erläutert.

Tabelle 2.1: Übersicht der Klassifikation von Flachdächern

Absch.	Klassifikation	Merkmal
2.1.2	Art der Nutzung	nicht genutzte begehbar befahrbar begrünt
2.1.3	Dachneigung	Terrassendach Dichtdach Deckdach
2.1.4	Dachentwässerung	innen liegend außen liegend
2.1.5	Lage der Wärmedämmung	Belüftetes Dach Nicht belüftetes Dach Umkehrdach
2.1.6	Konstruktionskonzepte der Tragschicht	Massivkonstruktionen Holzkonstruktionen Stahlkonstruktionen

2.1.2 Art der Nutzung

Auf Grund der zunehmenden Grundstückspreise gewinnt das Flachdach als Nutzfläche immer mehr an Bedeutung. Die Art der Nutzung gibt Aufschluss hinsichtlich der Belastbarkeit von Flachdächern. Je stärker das Dach genutzt werden darf, umso größer sind die Verkehrslasten mit, direkten Auswirkungen auf die Abmessungen der Tragstruktur. Mit zunehmender Nutzung ergeben sich ggf. Tragreserven, die für die nachträgliche Installation einer PV-Anlage genutzt werden können. Eine Untersuchung der Tragstruktur hinsichtlich der zusätzlichen Belastung ist jedoch immer vorzunehmen. Die bauphysikalischen Schichten von genutzten Flachdächern sind ebenfalls für höhere Beanspruchungen zu bemessen (z.B. „Wärmedämmstoffe für genutzte Dach- und Deckenflächen müssen für den jeweiligen Einsatzzweck ausreichend druckbelastbar sein“ [4] Der Aufbau der bauphysikalischen Schicht ist ebenfalls stark von der Art der Nutzung abhängig (vgl. Kap. 2.1.5). Flachdächer werden wie folgt nach der Art der Nutzung klassifiziert.

Nicht genutzte Flachdächer

Bei nicht genutzten Dachflächen sind die Verkehrslasten in den Schneelasten enthalten [1], somit ist die Tragkonstruktion solcher Dächer für zusätzliche hohe

Belastungen nicht geeignet. Diese Dachflächen sind nur für übliche Erhaltungsmaßnahmen, Reparaturen zugänglich, z.B. Dächer von Lagerhallen, Scheunendächer. Bei diesen Dächern können zusätzliche Lasten nur dann aufgebracht werden wenn sie bereits in der Tragwerksplanung vorsätzlich geplant oder unwissentlich einberechnet wurden, z.B. in Form von zu hoch angesetzten Schneelasten.

Begehbare Flachdächer

Bei dieser Art der Nutzung kommen zu den üblichen Schnee- und Windlasten noch Verkehrslasten hinzu. Der Abtrag dieser Lasten erfolgt in Abhängigkeit von der Anordnung des bauphysikalischen Systems und der Tragstruktur. Die Dämmung bei gedämmten Flachdächern muss unter anderem trittfest sein. Dachterrassenplatten sind in einem Feinkiesbett zu legen um die Abdichtung zu schützen. Grundsätzlich besteht die Tragschicht aus massiven Stahlbetonplatten, um den Abtrag der zusätzlichen Lasten zu gewährleisten. Die bauphysikalischen Schichten werden als Warm- bzw. Umkehrdach ausgebildet.

Befahrbare Flachdächer

Derartige Konstruktionen sind meistens über Tiefgaragen bzw. Parkdecks vorgesehen. Hier werden die Tragstruktur und die bauphysikalischen Schichten extremen Beanspruchungen ausgesetzt und beinhalten Lastreserven. In Abhängigkeit von der Art des Fahrbahnbelages (Pflastersteine, Betontragschicht) können Verankerungspunkte gesetzt werden, so dass eine frei tragende Konstruktion der PV-Anlage nicht notwendig ist. Befahrbare Flachdächer haben u.U. auch bauphysikalische Schichten, sie werden entweder als Warm- oder als Umkehrdach (vgl. Kap. 2.1.5) ausgeführt.

Begrünte Flachdächer

Dachbegrünungen werden „...aufgrund des gestiegenen ökologischen Bewusstseins auch im industriellen Bereich steigen ... und...seitens der Gesetzgeber mehr und mehr die entsprechenden Voraussetzungen geschaffen werden, um naturnahe Flächen...wieder zu gewinnen“ [5]. Begrünte Dachflächen werden in extensive und intensive Dachbegrünungen unterteilt. Unter extensiver Begrünung versteht man das Bepflanzen von extrem dünnen Substratschichten, mit anspruchslosem, dem Flachdach angepassten Pflanzenfamilien. Die extensive Begrünung hat durch ihren relativ unkomplizierten Aufbau den höchsten Marktanteil. Begrünt werden i.d.R. nur Dächer mit Abdichtungen. Die Anforderungen an die Unterkonstruktion steigen durch die Begrünung.

Kombinationsflächen

Diese Art der Nutzung vereinigt die o.g. Nutzungsarten auf einem Dach, z.B. in einem Parkplatz mit einem Kinderspielplatz und einer Wiese.

Abschließend kann gesagt werden: Wenn die Nutzung des Daches nicht beeinträchtigt werden darf, ist es bei dem Konzept für eine PV-Anlage notwendig auf Stützkonstruktionen zurückzugreifen. Hierbei überspannt die PV-Anlage den genutzten Bereich, so dass darunter ein Freiraum entsteht. Das dachnahe Stützsystem kann nur dann angewendet werden, wenn die Dachnutzung nicht mehr gewünscht ist. Aufgrund des komplexen Schichtenaufbaus von genutzten Dächern, ganz besonders bei Gründächern, ist bei den Auflagerpunkten hohe Sorgfalt geboten, um die Dichtigkeit des Daches sowie die Funktion sämtlicher Schichten zu gewährleisten. Die zusätzliche Last, die durch eine PV-Anlage auf ein genutztes Dach gebracht wird stellt generell kein Problem dar, da durch die berücksichtigten Nutzlasten in der Statik Lastreserven freiwerden.

2.1.3 Dachneigung

„Dachneigung ist die Neigung der Dachkonstruktion (Unterkonstruktion) gegen die waagerechte. Das Maß der Dachneigung wird ausgedrückt als Winkel zwischen der waagerechten und der Dachfläche in Grad ...“ [6].

Es gibt keine klare Definition bis zur welcher Dachneigung ein Dach als flach gilt. Die DIN 18531 [II] definiert Anforderungen an Dachabdichtungen und legt dabei eine Mindestdachneigung von $\Phi \leq 2^\circ$ fest. Wird dieser Wert unterschritten gilt das Flachdach als Sonderkonstruktion und muss somit besondere Anforderungen erfüllen.

Eindeutiger lassen sich Dächer mit den Begriffen „Dächer mit Dachdeckung (Deckdächer)“ und „Dächer mit Dachabdichtung (Dichtdächer)“ klassifizieren [6].

Aus der Sicht der PV liegt der optimale Einstrahlungswinkel für PV-Module im Bereich von 25° bis 30° [7]. Bei flacher geneigten Dächern führt das zu einer Minderung des Ertrags, was durch ein Aufständersystem kompensiert werden kann. Aus diesem Grund ist es sinnvoll auch flach geneigte Dächer zu den Flachdächern zu zählen. Damit ist die Dachneigung eins der wesentlichen Kriterien zur Entscheidung ob bei einer Anlage eine Aufständersystem notwendig ist oder nicht. Die Einteilung wird wie folgt definiert:

Neigungsspektrum: $0^\circ \leq \Phi \leq 25^\circ$. Unterteilung in drei Bereiche: 1. Terrassendach mit der Dachneigung $0^\circ \leq \Phi \leq 2^\circ$; 2. Dichtdach mit der Dachneigung

$2^\circ \leq \Phi \leq 15^\circ$; 3. Deckdach mit der Dachneigung $15^\circ \leq \Phi \leq 25^\circ$. Als die am häufigsten vorkommende Dachneigung kann bei Flachdächern die mit $2^\circ \leq \Phi \leq 5^\circ$ eingeschätzt werden.

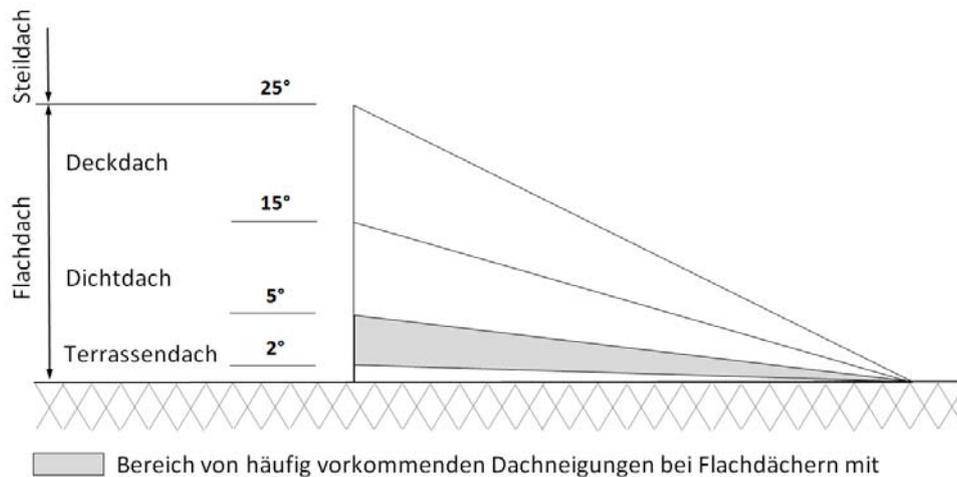


Bild 2.1: Unterscheidung von Flachdächern nach der Dachneigung.

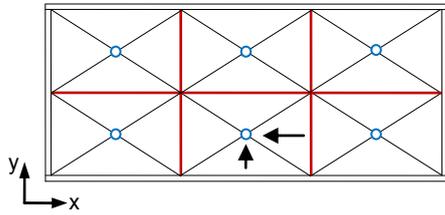
Für den Entwurf des Montagesystems wird der Bereich der häufig vorkommenden Dachneigungen im Bereich von Flachdächern mit Dachdichtungen, sowie flach geneigten Dächer bis $\Phi \leq 15^\circ$ betrachtet. Bei diesen Dächern werden oftmals membranförmige Dachdeckungen (vgl. Kap. 2.1.6) verwendet. In diesem Fall sind befestigungslose Lösungen nicht mehr realisierbar, das Montagesystem kann jedoch über Zusatzkonsolen, die in zahlreicher Form auf dem Markt vertreten sind, als Schraubverbindung angebunden werden.

2.1.4 Dachentwässerung

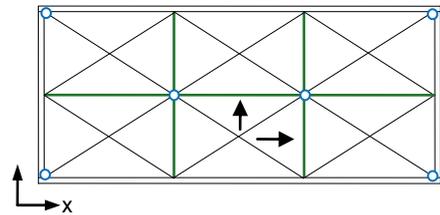
Unterschieden werden Dachentwässerungen nach ihrer geometrischen Anordnung auf dem Dach. Daraus ergeben sich drei unterschiedliche Systeme: Die innenliegende Entwässerung (Gullys), die außenliegende Endwässerung (Rinnen) sowie eine Kombination der beiden Systeme. Abhängig vom eingesetzten System ergeben sich unterschiedliche Gefällerichtungen auf dem Dach (vgl. Bild 2.2). Bei großflächigen Industriedächern kommen vermehrt innenliegende und kombinierte Entwässerungssysteme in Verbindung mit Gefälledämmung zum Einsatz. Dabei bildet die Dämmung entweder positiv oder negativ flach geneigte Zeltdächer aus.

Die Endwässerungssysteme müssen mindestens einmal jährlich gewartet werden und sollten aus diesem Grund frei zugänglich sein.

Zwei Entwässerungsrichtungen

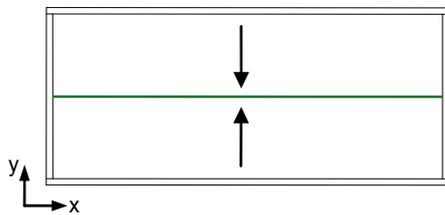


Innenliegende Entwässerung vom First weg entwässernd

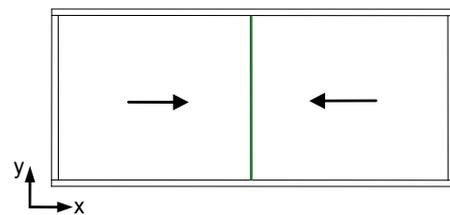


Innenliegende Entwässerung Zur Traufe hin entwässernd

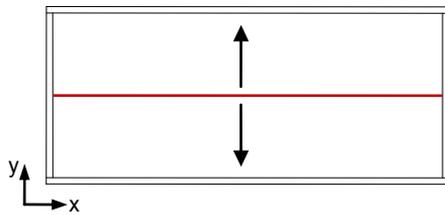
Eine Entwässerungsrichtung



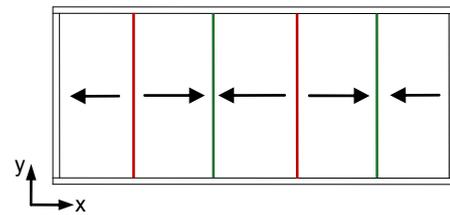
Innenentwässerung Entwässerungsrinne parallel zur Längsachse des Hauses



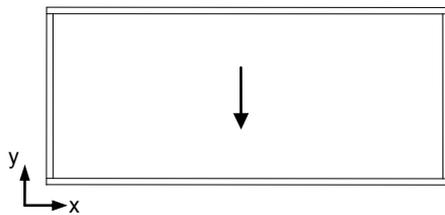
Innenentwässerung Entwässerungsrinne parallel zur Querachse des Hauses



Außenentwässerung Entwässerungsrinne parallel zur Längsachse des Hauses



Innenentwässerung Mehrere Entwässerungsrinnen Parallel zur Querachse des Hauses



Entwässerung bei Pultdächern Entwässerungsrinne parallel zur Längsachse des Hauses

- Trauflinie
- Firstlinie
- \leftarrow \rightarrow Entwässerungsrichtung
- Gully

Bild 2.2: Arten der Entwässerung von Flachdächern

2.1.5 Lage der Wärmedämmung

Belüftetes Dach

Das Charakteristikum bei einem belüfteten Dach (frühere Bezeichnung: „Kalt-dach“) ist die zweischalige Ausbildung. Zwischen Dämmschicht (untere Dachscha-le) und Dichtschicht (obere Dachscha-le) ist ein Belüftungsraum angeordnet. Durch die ständige Belüftung wird die Tauwasserbildung im Dachsystem vermieden, und die thermische Ausdehnung wird nicht auf die darunterliegenden Schichten über-tragen. Der Belüftungsraum muss mindestens 15 cm betragen, denn im Gegen-satz zum Steildach wird beim Flachdach die Belüftung durch den Windzug und nicht durch den thermischen Auftrieb hervorgerufen. Die obere Schale wird meis-tens als Leichtbaukonstruktion entweder als Holzständerwerk mit Verschalung oder als Stahlkonstruktion mit Trapezblech gebaut. Die tragende untere Schale ist oft als Stahlbetonkonstruktion anzutreffen.

Nicht belüftetes Dach

Beim nicht belüfteten Dach (frühere Bezeichnung: „Warmdach“) wird auf die Durchlüftung verzichtet. Durch die einschalige Konstruktion erhält man einen ein-facheren Dachaufbau. Die Wärmedämmung liegt unmittelbar zwischen Trag- und Dichtschicht. Dies erfordert den Einbau einer Dampfsperre über der Tragschicht, um Dachdurchfeuchtungen und Kondensatbildung im Bereich der Dämmschicht zu vermeiden. Dies ist die häufigste Flachdachart.

Das Umkehrdach

Grundsätzlich ist das Umkehrdach ein einschlägiges, nicht belüftetes Dach. Das Umkehrdach stellt eine Sonderform des nicht belüfteten Daches dar, bei dem die Dichtschicht unterhalb der Dämmschicht angeordnet wird. Dadurch wird die empfindliche Dichtschicht vor Witterungseinflüssen wie Frost-Tau-Wechsel sowie Son-neneinstrahlung durch die Dämmschicht geschützt. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Wärmedämmung wasser-, frost-, formbeständig sowie verrot-tungs-, trittfest und maßgenau ist. Diese Anforderungen werden von Hartschaum-platten aus extrudiertem Polystyrol erfüllt. Sie müssen durch eine Auflast be-schwert werden, z.B. in Form von Kiesschüttungen, Plattenbeläge oder Begrü-nungen. Zwischen Dämmung und Beschwerung wird eine Trennlage angeordnet, welche das Eindringen der Beschwerung in die Dämmschicht verhindert.

Duo- oder Plusdach

Das Duo- bzw. Plusdach stellt innerhalb der Umkehrdach-Familie eine Besonderheit dar. Hier werden auf einen Standard-Warmdach-Aufbau, außerhalb der Abdichtung, eine weitere Wärmedämmung und eine Kiesschicht aufgebracht. Duo- und Plusdach unterscheiden sich hinsichtlich des Aufbaus nicht. Zweierlei Namen für ein und denselben Aufbau existieren nur deswegen, weil ein Dach mit diesem Konstruktionsprinzip bei einem Neubau als Duodach bezeichnet wird und im Sanierungsfall (also bei bestehendem Warmdachaufbau) als Plusdach bezeichnet wird. Duodächer werden in der Praxis äußerst selten gebaut, da sie als zu teuer in der Ausführung betrachtet werden. Duodächer werden oft bei Dachsanierungen eingesetzt. Aufgrund der erhöhten Anforderungen der Energieeinsparverordnung sind sie eine gute Ergänzung zu bestehenden Dämmsystemen.

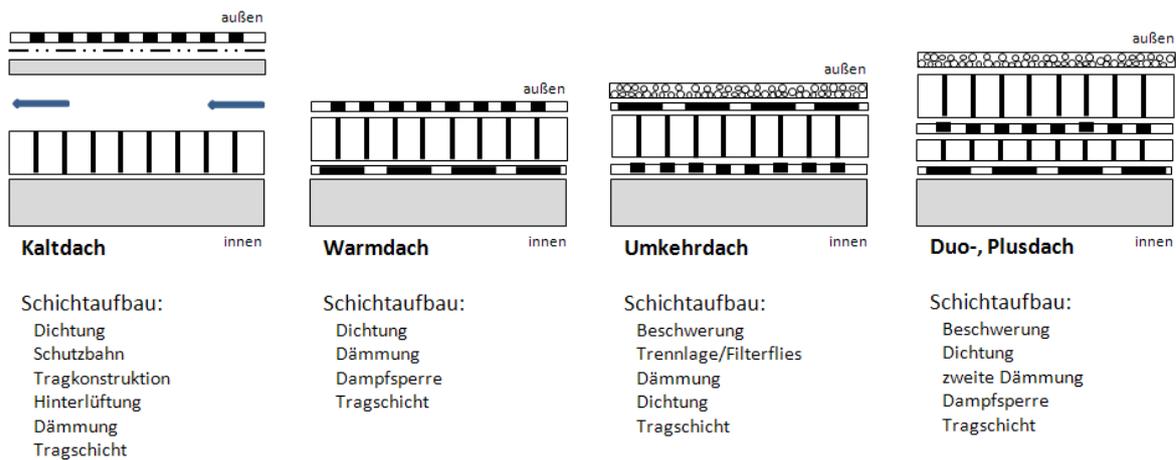


Bild 2.3: Unterscheidung des Dachaufbaus nach der Lage der Dämmung

2.1.6 Konstruktionskonzepte der Tragschicht

Die Auseinandersetzung mit den tragenden Bauteilen soll nur einen allgemeinen Einblick geben. Aufgrund der vertraglichen Situation im Unternehmen obliegt die Prüfung der Tragfähigkeit des Systems in Bezug auf die zusätzlichen Lasten, die durch die PV-Anlage verursacht werden, dem Bauherrn. Hinzu kommt, dass das Aufständersystem ohne eine Anbindung an das Tragsystem auskommen soll (vgl. Kap. 5.1 [i]).

Die Dimensionierung der Tragstruktur von Flachdächern ist direkt für seine Tragfähigkeit verantwortlich. Wirtschaftliche Bauweisen erfordern, gibt es auch bei den Dächern, durch Tragwerksoptimierungen und lassen wenig Spielraum für Tragreserven. Sollen zusätzliche Lasten durch eine PV-Anlage auf Bestandsgebäude

mit lastempfindlichen Flachdächern (z.B. Industriedächer) gebracht werden, dann dürfen diese nur minimal sein.

„Die Tragstrukturen von Flachdächern können zum einen aus einem filigranen, balkenförmigen Werk gebildet werden, wobei die Flächen zwischen den Balken mit einem dünnen membranförmigen Körper geschlossen werden. Die Tragfähigkeit der membranförmigen Körper ist dabei begrenzt und auf ihre geringen geometrischen Abmessungen abgestellt“ [8]. Zum anderen können die Tragstrukturen aus durchgehend massiven Körpern bestehen, die entweder als Balken, Platten oder Plattenbalken ausgebildet werden. Bei beiden Strukturen gilt, je länger die Spannweite umso größer die Bauteilabmessungen in der beanspruchten Richtung. Die einzelnen Elemente der Tragstruktur können aus unterschiedlichen Materialien wie Beton, Stahl, Holz bestehen. In Abhängigkeit der Nutzung des Gebäudes kann die Tragstruktur entweder mit oder ohne bauphysikalische Schichten vorkommen.

Tragschichten eines Flachdaches bringen unterschiedliche Biegesteifigkeiten mit sich. Stahlbeton, in Form von Flachdecken, Rippendecken, Kassettendecken, Hohldecken gilt als steifes Material. Weit gespannte Trapezblechprofile hingegen können als biegeweich angesehen werden. Dies hat direkte Auswirkungen auf die Anforderungen für die darüber liegenden bauphysikalischen Elemente.

Das Leichtbaudach

Im Bereich von Flachdächern sowie flach geneigten Dächern, in Leichtbauweise sind membranförmige Dachdeckungen auf Stahl oder Holzkonstruktionen (Profildächer) weit verbreitet, z.B. bei Industriedächern. Diese Art von Tragstruktur ist jedoch hinsichtlich zusätzlicher Lasten nicht ganz unproblematisch (biegeweich). Aus wirtschaftlichen Gründen werden diese Dächer statisch knapp kalkuliert, so dass sie aufgrund fehlender Lastreserven für PV-Anlagen nur bedingt nutzbar sind. Aus diesem Grund ist es bei diesen Dächern besonders wichtig eine statische Untersuchung durchzuführen. Leichtbaudächer haben folgende Dachdeckungen:

- ◆ Trapezprofile
- ◆ Falzprofile
- ◆ Wellblechplatten
- ◆ Bitumenwellplatten
- ◆ Sandwichelemente

Sie bestehen aus unterschiedlichen Materialien wie Stahl, Alu, Kunststoff, Bitumen und sind gedämmt und nicht gedämmt erhältlich. Auf Grund der großen Produktvielfalt auf dem Markt wird auf eine nähere Beschreibung der einzelnen Formen und Arten verzichtet.

2.1.7 Bauphysikalische Schichten

Bei einem nachträglichen Aufbau eines PV-Generators auf einem Flachdach korrespondiert das statische Tragwerk von Flachdächern im besonderen Maße mit bauphysikalischen Elementen. In direkter geometrischer Nähe zur Tragschicht befinden sich die Dachdichtung und die Dämmung. Die Art der Nutzung eines Flachdaches hat einen direkten Einfluss darauf, welchen mechanisch, technologischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften die einzelnen Bauprodukte genügen müssen. Das bauphysikalische System, bei genutzten und nicht genutzten Dächern, setzt sich zusammen aus folgenden Funktionsschichten [4]:

- ◆ Unterlage
- ◆ Haftbrücke
- ◆ Ausgleichsschicht/Trennschicht/-lage
- ◆ Luftdichtigkeitsschicht
- ◆ Dampfsperre
- ◆ Wärmedämmung
- ◆ Belüfteter Dachraum
- ◆ Dampfdruckausgleichsschicht/Trennlage
- ◆ Dachabdichtung/Abdichtung
- ◆ Wurzelschutz/Schuttlage/Schutzschicht
- ◆ Oberflächenschutz/Auflast/Dachbegrünung/Nutzschicht

Aus der Sicht des Entwurfes für des Montagesystems, welches nachträglich auf ein Flachdach gebracht wird und ohne Verankerungspunkte auskommen soll, ist die Auseinandersetzung mit den Funktionsschichten, die in direkter Lage zum Montagesystem stehen wichtig, um die Konstruktion auf ihre Eigenschaften abzustimmen. Dies sind im Besonderen die Wärmedämmung, Abdichtung und der Oberflächenschutz/Auflast.

Wärmedämmstoffe

„Für die Wärmedämmung von Dächern mit Abdichtungen dürfen nur solche Dämmstoffe verwendet werden, die bauaufsichtlich eingeführten Normen, allgemeinen bauaufsichtlichen oder europäischen technischen Zulassungen entsprechen“ [4]. Grundsätzlich dürfen „Dämmplatten und rollbare oder klappbare Wär-

medämbbahnen...lose verlegt, oder werkstoffspezifisch unter Berücksichtigung der Sicherung der Dachabdichtungen gegen abheben durch Windkräfte, vollflächig oder teilflächig verklebt oder mechanisch befestigt werden“ [4].

Die Unterscheidung von Wärmedämmstoffen erfolgt auf der Rohstoffbasis. Dabei wird zwischen organischen und anorganischen Wärmedämmstoffen unterschieden (vgl. Tabelle 2.2). Im Flachdachbereich sind beide Dämmstofffamilien vertreten. Anorganische Dämmstoffe wie Mineralwolle (Stein-, Glaswolle) werden hauptsächlich dort eingesetzt wo erhöhte Brandschutzanforderungen gestellt werden (Industriehallen, Hochhäuser, Einkaufszentren). Mit 60 % Marktanteil sind dies die am weitesten verbreiteten Dämmstoffe in Deutschland.

Auf Dächern bei denen die Wärmedämmung nur durch eine Dichtung oder gar nicht geschützt ist, (nicht belüftete Dächer, Umkehrdächer) besteht bei zu hohen Punktlasten auf das bauphysikalische System das Risiko, durch Eindrücken der Dämmschicht, örtlicher Beschädigungen der Dichtung durch Überdehnung, Undichtigkeiten im Dach zu erzeugen. Die Punktlasten treten am Auflager auf und können durch eine entsprechend große Fläche im Entwurf gemindert werden. Aus diesem Grund ist es erforderlich in Erfahrung zu bringen welche Dämmstoffe im Flachdachbereich verwendet werden dürfen und wie hoch ihr Widerstand gegen Druckbeanspruchungen ist.

In der Tabelle 2.2 sind die Arten, Einsatzgebiete sowie die Differenzierung hinsichtlich der Druckbeanspruchung genormter Dämmstoffe auf der Grundlage der DIN 4108-10 [III] dargestellt.

Tabelle 2.2: Bezeichnungen von Dämmstoffen

Dämmstoffarten			
Mineralwolle	MW	DIN EN 13162: 2009-02	anorganisch
Expandiertem Polystyrol	ESP	DIN EN 13163: 2009-02	organisch
Extrudiertem Polystyrol	XPS	DIN EN 13164: 2009-02	organisch
Polyurethan-Hartschaum	PUR	DIN EN 13165: 2009-02	organisch
Phenolharzschaum	PF	DIN EN 13166: 2009-02	organisch
Schaumglas	CG	DIN EN 13167: 2009-02	anorganisch
Holzwole	WW	DIN EN 13168: 2009-02	organisch
Holzwole Mehrschichtplatten	WW-C	DIN EN 13168: 2009-02	organisch
Blähperlit	EPB	DIN EN 13169: 2009-02	anorganisch
Expandiertem Kork	ICB	DIN EN 13170: 2009-02	organisch
Holzfasern	WF	DIN EN 13171: 2009-02	organisch
Anwendungsgebiete			
Dach	DAA	Außendämmung von Dach oder Decke, vor Bewitterung geschützt, Dämmung unter Abdichtungen	
	DUK	Außendämmung des Daches, der Bewitterung ausgesetzt (Umkehrdach) ^a	
^a : Es gelten die Festlegungen nach DIN 4108-2			
Druckbelastbarkeitsklassen			
Druchbelastbarkeit	dm	Mittlere Druckbelastbarkeit	Nicht genutztes Dach mit Abdichtun
	dh	Hohe Druckbelastbarkeit	Genutzte Dachflächen, Terrassen
	ds	Sehr hohe Druckbelastbarkeit	Industrieböden, Parkdeck
	dx	Extrem hohe Druckbelastbarkeit	Hoch belastete Industrieböden, Parkdeck

Druckspannung / Druckfestigkeit

Das Festigkeitsverhalten von Dämmstoffen wird in Abhängigkeit ihrer Rohdichte und ihrer Dicke bestimmt. Dabei wird unterschieden zwischen Druckspannung und Druckfestigkeit. Für die Bestimmung der Druckspannung wird im Allgemeinen eine Stauchung von 10 % der dafür notwendigen Druckkraft unterstellt. Bei der Druckfestigkeit wird die Kraft angegeben, bei welcher der Probekörper zusammenzubrechen beginnt. Es ist also zu beachten, dass der angegebene Wert eine Druckspannung bei einer bestimmten Stauchung oder eine Druckfestigkeit angibt. Es muss besonders darauf hingewiesen werden, dass die angegebenen Werte für Druckspannung bei 10 % Stauchung oder Druckfestigkeit auf keinen Fall in voller

Höhe zur Planung dauerbelasteter Dämmkonstruktionen verwendet werden dürfen. Unter Dauerbelastung können plastische Verformungen, einem Kriechen vergleichbar, auftreten. Die angeführten Werte werden jedoch meist nach DIN EN 826 [IV] innerhalb eines Zeitraums von nur wenigen Minuten ermittelt. Das Langzeitverhalten von Schaumkunststoffen und Dämmstoffen allgemein unter Dauerdruckbelastung wird nach DIN EN 1606 [V] bestimmt. Das Langzeitverhalten ist von Bedeutung bei extremen Belastungen, wie z.B. unter Fundamenten.

Bei der Beurteilung des Festigkeitsverhaltens hinsichtlich der Beanspruchung durch Auflasten einer PV-Anlage liefert die Druckspannung bei 10 % Stauchung bzw. die Druckfestigkeit der Dämmstoffe genügend Aussagen. Die Tabelle 2.3 stellt das Festigkeitsverhalten von Dämmstoffen in Abhängigkeit von deren Art, dem Anwendungsgebiet und der Druckfestigkeitsklasse nach DIN EN 4108-10 [III] dar.

Tabelle 2.3: Festigkeitsverhalten von Wärmedämmstoffen

Art	Anwendungsgebiet	Mindestdruckfestigkeitsklasse	Druckspannung bzw. Druckfestigkeit [kPa] ^a	Punktlast [N]
MW	DAA	-	CS(10/Y) 60	PL(5) ^e 500
ESP		dm	...100	-
XPS	DAA	dm	CS(10/Y) ^d 200	-
	DUK	dh	CS(10/Y) 300	-
PUR			dh	...100
PF		dh	CS(Y) ^c 100	-
CG		dh	CS(Y) 200	-
WW	DAA	-	CS(10) ^b 100	-
WW-C		dm	CS(10) 50	-
EPB		ds	CS(10/Y) 200	-
ICB		-	CS(10) 100	-
WF		dh	CS(10/Y) 70	-

^a Druckeinheit Kilo-Pascal 1 kPa = 1 kN/m² = 100 kg/m²
^b Druckspannung bei 10 % Stauchung
^c Druckfestigkeit
^d Beide
^e Punktlast bei 5 mm Verformung

Diese Zahlen zeigen, dass im Bereich Flachdach organische Dämmstoffe genügend Festigkeit aufweisen, so dass eine Belastung durch eine PV-Anlage unbedenklich ist. Lediglich bei den organischen Dämmstoffen Mineralwolle, Holzwolle-, Mehrschichtdämmplatten sowie Holzfaser ist im Einzelfall zu prüfen, ob zusätzliche Maßnahmen für den Lastabtrag getroffen werden müssen. Mineralwolle ist hinsichtlich Punktlasten ein sehr empfindliches Dämmmaterial. Deshalb sieht die DIN eine Prüfung vor, in der das Material durch Punktlasten (PL) beansprucht wird. Diese Angabe ist bei Mineralwolle maßgebend und sollte vor der Belastung des Dämmstoffs geprüft werden.

Dachdichtung

„Eine Dachabdichtung ist ein flächiges Bauteil zum Schutz eines Bauwerks gegen Niederschlagswasser. Sie besteht aus einer über die gesamte Dachfläche reichenden, wasserundurchlässigen Schicht. Zur Abdichtung gehören auch Anschlüsse, Abschlüsse, Dachdurchdringungen und Fugenausbildungen“ [4].

Überwiegend wird die Dachabdichtung mittels Bitumen-, Kunststoff- sowie Kautschukbahnen realisiert.

Dachdichtungen mit Bitumenbahnen werden mindestens in zwei Lagen eingebaut [4]. Dadurch ist eine höhere Sicherheit der Dichtigkeit der Nahtverbindungen gegeben. Bei mehrlagigen Abdichtungen muss für die obere Lage ein Polymerbitumen mit Schiefersplittbestreuung verwendet werden.

Dachabdichtungen mit Kunststoffbahnen dürfen im Gegensatz zu Bitumenbahnen einlagig eingebaut werden [4].

Dachdichtungen müssen den planmäßigen mechanischen Beanspruchungen stand halten. Bei nicht genutzten Dächern wird unterschieden zwischen hoher (Stufe I) und mäßiger (Stufe II) Beanspruchung. „Eine hohe mechanische Beanspruchung liegt vor, wenn mindestens eine der folgenden Beanspruchungsbedingungen gegeben ist“ [4]:

- ◆ Beanspruchung aus dem Untergrund und oder der Tragkonstruktion durch:
- ◆ Plattenförmige Untergründe z.B. Betonfertigteile,
- ◆ harte Dämmstoffe (XPS) deren Bewegung sich auf die Dämmstoffe auswirken kann,
- ◆ Tragkonstruktionen aus Trapezprofil,
- ◆ Schalungen aus Holz oder Holzwerkstoffen,
- ◆ Beanspruchung durch mechanische Befestigung der Dachdichtung,

- ◆ Beanspruchung infolge weicher Unterlage z.B. durch Dammstoffe aus Mineralwolle,
- ◆ Beanspruchung durch Arbeiten auf dem Dach, z.B. durch regelmäßige Inspektionen oder Wartungsarbeiten,
- ◆ Altdächern, deren bestehende Dachabdichtung unmittelbar als Unterlage für die neue Dachabdichtung dienen soll.

Mäßige mechanische Beanspruchungen liegen vor, wenn keine der o.g. erhöhten Bedingungen gegeben sind.

Generell kann man sagen, dass dort wo Dichtungen der Stufe I eingebaut sind der Aufbau einer PV-Anlage keine nachteiligen Beanspruchungen für die Dachabdichtung darstellt.

Bei genutzten Dachflächen ist in den meisten Fällen ein Oberflächenschutz oberhalb der Dachdichtung angeordnet, so dass hier die mechanische Beanspruchung durch eine PV-Anlage als unproblematisch eingestuft wird.

Vor der Installation einer PV-Anlage ist es ratsam mit dem Bauherrn zu klären ob die Dachdichtung noch intakt ist und wann sie eingebaut wurde. Aufgrund natürlicher und künstlicher Alterung verändern Bitumen-, Polymerbitumen- und Kunststoffbahnen ihre Eigenschaften. Ist z.B. eine Bitumenabdichtung auf einer Holzschalung aufgebracht, können Risse infolge des Schwindens des Holzes in der Abdichtung entstehen. Nach der Installation einer Anlage ist das Sanieren eines Daches sehr kostenintensiv und in einigen Fällen gar nicht mehr zu bewerkstelligen, ohne den kompletten Ab- und Aufbau der Anlage.

Oberflächenschutz/Auflast

Mit zunehmender mechanischer Beanspruchung der Dachoberfläche, durch die Art der Nutzung sowie extreme Bewitterungseinflüsse kann ein Oberflächenschutz oberhalb der Dichtung notwendig werden. Er kann auch als Lagesicherung der Dichtung dienen. Folgende Materialien eignen sich in Abhängigkeit ihrer Eigenschaft:

- ◆ Bei Bewitterungseinflüsse geeignet:
Bestreuung (Feinsplitt), Bekieselung (Feinkies)
- ◆ Bei mechanische Beanspruchungen geeignet:
Bautenschutzmatten, Geotextilien, Betonplatten in Kiesbett, Betonfahrbahnen

Vorhandene Auflasten auf Dächern sind aus Sicht der Montage von PV-Anlagen positiv anzusehen. Sie können zur Beschwerung des Tragsystems genutzt werden, so dass keine bzw. nur geringe zusätzliche Auflasten notwendig sind.

2.2 Photovoltaikanlage

Eine PV-Anlage) ist eine Solarstromanlage, in der mittels Solarzellen ein Teil der Sonnenstrahlung in elektrischen Strom umgewandelt wird. Der häufigste Fall sind netzgekoppelte PV-Anlagen. Hier wird der erzeugte Gleichstrom in Wechselstrom umgewandelt und ganz oder teilweise ins öffentliche Netz eingespeist. Die wesentlichen Hauptkomponenten einer netzgekoppelten PV-Anlage sind der PV-Generator und der Wechselrichter.

PV-Generator

Wie Bild 2.4 zeigt basieren PV-Anlage auf einem modularen Prinzip. Solarzellen werden in zu Zellstrings zusammengeschlossen, mehrere Zellstrings ergeben ein Modul, eine Aneinanderreihung von Modulen einen Strang (eng. String) und mehrere Strings einen PV- oder Solargenerator. Dieses Prinzip hat folgende Vorteile: zum einen lassen sich Flächen durch individuelle Planung optimal ausnutzen, zum anderen ist es montagefreundlich. In Abhängigkeit von der Leistung sind Solarmodule auf dem internationalen Markt in einer Vielzahl verschiedener Größen erhältlich.

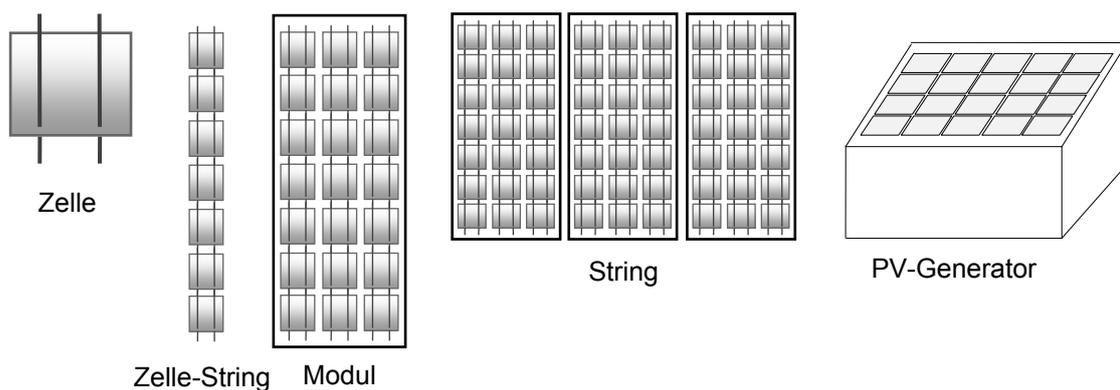


Bild 2.4: Modulares Prinzip einer PV-Anlage

Wechselrichter

Der Solarwechselrichter ist das Bindeglied zwischen PV-Generator und Wechselstromnetz. Seine grundlegende Aufgabe ist es den vom PV-Generator erzeugten

Gleichstrom in Wechselstrom umzuformen und an die Frequenz und Höhe der Spannung des Stromnetzes anzupassen. Bei String-Wechselrichtern werden ein oder mehrere Strings an ein Gerät angeschlossen. Der Wechselrichter wird dann an einer zugänglichen Stelle, bei gebäudegebundenen PV-Generatoren meistens im Gebäudeinneren platziert. Eine Innovation auf dem Markt ist z.Z. der Modul-Wechselrichter. Dies sind kleine Einheiten die in direkter Nähe zum Modul angeschlossen werden (vgl. Bild 4.3).

2.2.1 Einsatzbereiche von PV - Anlagen

Unterschieden wird zwischen gebäudegebundenen und gebäudeungebundenen PV-Anlagen. Prinzipiell kann PV in allen Bereichen der Gebäudehülle sowie auf Freiflächen, die direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, angeordnet werden. Hauptsächlich werden bei gebäudegebundenen Anlagen derzeit Dach, Fassaden, sowie Sonnenschutzelemente genutzt. Aus konstruktiver Sicht lassen sich drei unterschiedliche Prinzipien der Einbindung von solaren Energiesystemen definieren.

- ◆ Addition
- ◆ Substitution
- ◆ Integration

Bei der Addition werden die Module nachträglich, mittels eines konstruktiven Systems vor oder auf der bestehenden Gebäudehülle bzw. Freifläche angeordnet. Bei dieser Form der Einbindung übernimmt der Generator am Gebäude keine Funktionen der Gebäudehülle.

Bei der Substitution ersetzen Module einzelne Elemente der Gebäudehülle und übernehmen teilweise Ihre Funktion z.B. als Witterungsschutz bei einer Kaltfassade.

Bei der Integration werden Bauteile der Gebäudehülle durch Module vollständig ersetzt. Der Generator wird zur Gebäudehülle und übernimmt z.B. in Form eines Isolierglasverbundes all ihre Funktionen wie z.B. Wetterschutz, Wärmedämmung, Schallschutz, Sonnenschutz. Diese Form der Einbindung ist in vielen Einsatzbereichen nicht ganz unproblematisch. Bei Warmfassaden z.B. steigt durch die Integration die Temperatur der Module, wodurch ihr Wirkungsgrad sinkt [9].

Bei den o.g. Einsatzbereichen Dach, Fassade, Sonnenschutzelemente haben sich im Laufe der Zeit Unteranwendungen herausgebildet. Ihre Definition leitet sich im Wesentlichen vom konstruktiven Merkmal ab.

Der Einsatzbereich Dach unterteilt sich in Flachdächer und Schrägdächer (vgl. Bild 2.5). Bei additiver Anordnung von Generatoren auf Dächern spricht man von Aufdach-Anlagen. Ersetzen Module die Dachhaut und übernehmen somit den Feuchteschutz dann handelt es sich um eine Indach-Anlage.

Bei Fassaden wird nach den wärmetechnischen Eigenschaften, die das Modul übernimmt, unterschieden in Warm- und Kaltfassade. Bei Warmfassaden sind die Module vollständig integriert. In Kaltfassaden übernehmen die Module additiv oder substituierend die Funktion des Witterungsschutzes.

Einen weiteren Einsatzbereich von PV-Anlagen stellt der Sonnenschutz dar. Bewegliche Lamellen richten sich adaptiv zur Sonneneinstrahlung aus und erhöhen dabei den Ertrag.

Werden Module mittels einer gebäudeungebundenen Unterkonstruktion ausgerichtet, handelt es sich um Freilandanlagen. Sie werden meistens auf Ackerflächen realisiert. Die Module können entweder bodennah oder auf Stützen montiert werden. Der dadurch entstandene Freiraum unterhalb der Module kann als Lagerfläche genutzt werden (Aufstellfläche für Fahrzeuge, Lager für Stroh etc.). Auflager der Unterkonstruktion werden entweder durch Einrammen der Stützen oder durch Schütten von Betonfundamenten hergestellt. Da die Anlage leicht zugänglich und meistens auch unbeaufsichtigt ist, gewinnt die Sicherung der Module gegen Diebstahl bei Freiflächenanlagen besondere Bedeutung.

Das Bild 2.5 stellt die Einsatzbereiche von Generatoren dar und unterscheidet dabei zwischen gebäudegebundenen und gebäudeungebundenen Systemen. In Rahmen der Diplomarbeit wird der Einsatzbereich Flachdach und im Speziellen die Aufdachmontage betrachtet.

Einsatzbereiche

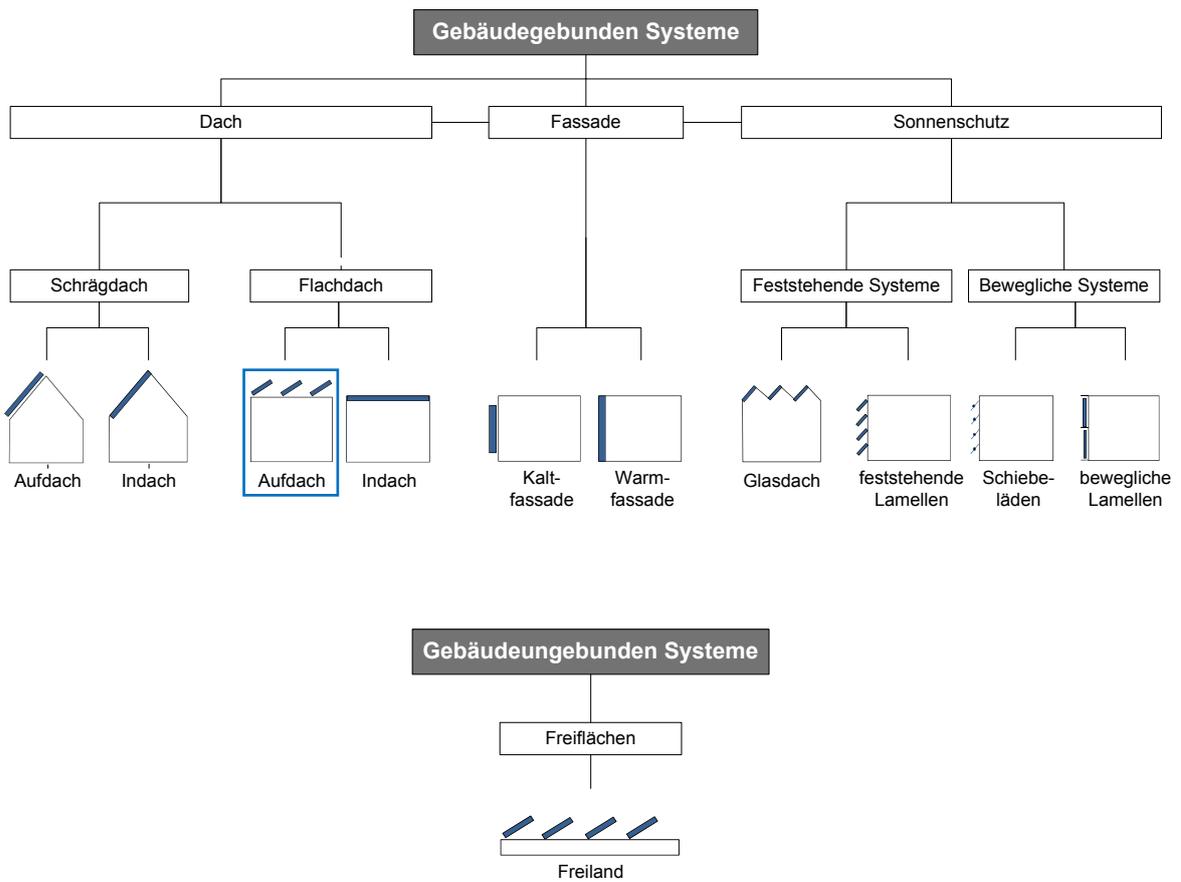


Bild 2.5: Einsatzbereiche von PV – Anlagen.

2.2.2 Aufdach-Systeme für Flachdächer

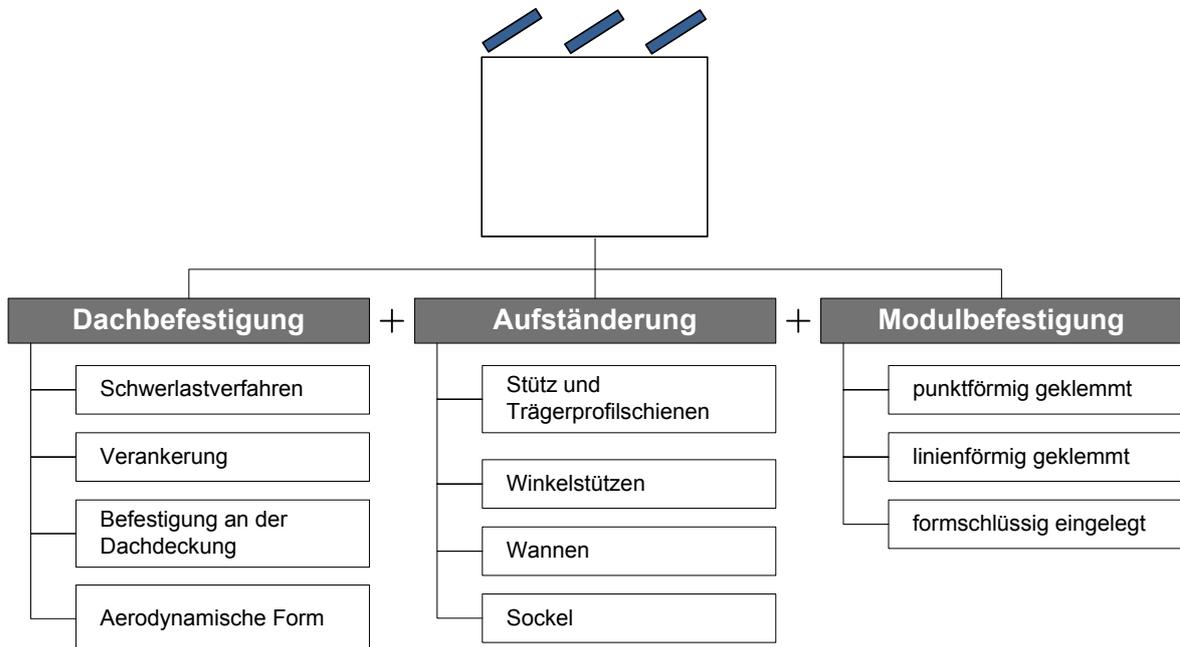


Bild 2.6: Aufdach: Elemente von Aufständersystemen

Allgemein

Bei Aufdach-Anlagen werden die Module auf einem Gestell oder einer anderen Art der Unterkonstruktion geneigt aufgestellt. Die Anordnung erfolgt reihenförmig in Strings. Dadurch wird die Zugänglichkeit des Daches eingeschränkt. Es ist sinnvoll, vor dem Aufbau der Anlage die Funktionsfähigkeit des Dachaufbaus zu prüfen, um über die Lebensdauer der Anlage kostspielige Sanierungsmaßnahmen zu vermeiden. Da sämtliche Bauteile der Unterkonstruktion der direkten Witterung ausgesetzt werden, sollte hier darauf geachtet werden, dass sie korrosionsbeständig sind. Diese Voraussetzung erfüllen die Materialien Aluminium, Edelstahl V2A sowie bestimmte Stahlbeschichtungen und Kunststoffe.

Dachbefestigung

Wie Bild 2.7 zeigt, gibt es vier unterschiedliche Möglichkeiten Photovoltaik auf Flachdächern zu montieren.

Welche Möglichkeit auf Flachdächern eingesetzt wird, ist in erster Linie von der Statik des Daches abhängig. Hat das Dach hohe Lastreserven, kann auf das Schwerlastverfahren (freie Aufstellung) zurückgegriffen werden. Mit abnehmenden Lastreserven können die Lasten mittels Verankerungen direkt in die Dachkons-

truktion eingeleitet werden. Eine Innovation im Bereich der Systemtechnik stellen sogenannte aerodynamische Aufständungen dar. Sie kommen ohne Befestigung und mit geringen Lasten aus. Bei Profildächern kann das Gestell unter bestimmten Voraussetzungen direkt mit der Dachdeckung verbunden werden.

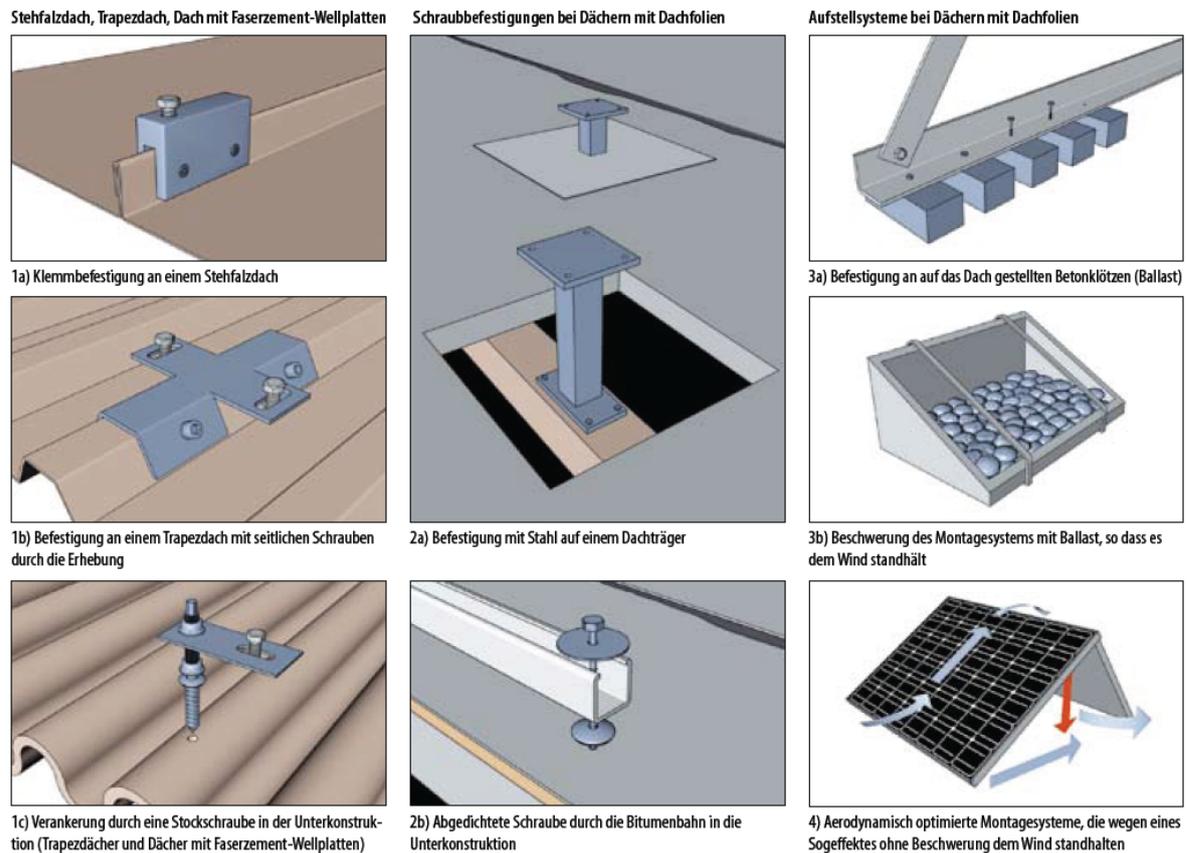


Bild 2.7: Montagevarianten auf Flachdächern (Photovoltaik 04/2009)

Schwerlastverfahren

Beim Schwerlastverfahren wird die Standsicherheit des Generators durch Lastelemente gewährleistet, die schwimmend auf das Dach gelegt werden. Als Lastelemente werden meistens herkömmliche Rasenkanten-, Gehwegplatten, Schwellen, Kies oder eigens angefertigte Sockel verwendet. Das Gestell kann entweder durch Schraubverbindungen an den Lastelementen befestigt werden oder durch Auflegen der Beschwerung auf vorgefertigte Rahmen gesichert werden. Eine weitere Möglichkeit der Beschwerung bieten Wannenelemente, auf die das Modul direkt geschraubt werden kann. Als Beschwerung dienen Kiesschüttungen oder Gehwegplatten, die in die Wannens hinein gelegt werden. Auf Kies-, und Gründächern kann die vorhandene Kiesschüttung bzw. das Substrat direkt genutzt wer-

den. Das Gestell wird auf großflächigen Blechen befestigt und auf die Dachhaut gestellt. Die Kiesschüttung bzw. das Substrat wird dann auf die Bleche geschüttet.

Die Höhe der Beschwerung muss so gewählt werden, dass die Standsicherheit bei maximaler Beanspruchung gewährleistet ist. Das hängt ab von der Gebäudegeometrie, der Gestellgeometrie und dem geografischem Standort. Als Richtwert gelten 100 kg/m^2 bei einer Modulneigung von 30° , in der Windzone I und einer Gebäudehöhe unter 10 m.

Verankerung

Kommt das Schwerlastverfahren aus statischen Gründen nicht in Frage, können die Strings fest mit der Dachkonstruktion verbunden werden. Die Kräfte werden über Traversen zu statisch günstigen Punkten geleitet und über Auflagerpunkte kraftschlüssig an die Dachkonstruktion angebunden. Im Bestand muss dafür die Dachhaut durchdrungen und nachträglich wieder angedichtet werden. Das Risiko von Durchfeuchtungen bei nachträglich hergestellten Andichtungsstellen ist sehr hoch. Aufgrund dieser Tatsache sowie den hohen Kosten schrecken die meisten Bauherrn von der Verankerung zurück. Meistens wird diese Befestigungsart bei Neubauten bzw. Dachsanierungen angewandt.

Befestigung an der Dachhaut

Bei Profildächern (vgl. Kap. 2.1.6) mit flachen Dachneigungen ($\Phi \leq 10^\circ$) kann es unter Umständen notwendig sein die Module aufzuständern. In Abhängigkeit der Profilform können speziell entwickelte Profilblechsellen, Falzklemmen oder Stockschrauben eingesetzt werden. Diese werden entweder mit der Dachhaut bzw. mit der darunter liegenden Dachkonstruktion verschraubt oder geklemmt. Dichtungen sorgen für die Dichtigkeit. Das Gestell kann mittels Schraubverbindung an die Ankerpunkte geschraubt werden. Voraussetzung ist, dass die Befestigung die auftretenden Windkräfte aufnehmen kann. Bei Profilblechsellen, die direkt mit der Dachhaut mittels Blechschauben befestigt werden, ist darauf zu achten, dass die Mindestblechdicke eingehalten wird.

Aerodynamische Form

Flachdächer mit Dichtungen und geringen Lastreserven, bei denen eine Durchdringung der Dachhaut nicht in Frage kommt, haben sich die Systemhersteller die aerodynamische Form zu Nutze gemacht. Die Rückseite des Gestells wird durch Bleche verschlossen, um Auftriebskräfte (Segeleffekt) zu unterbinden. Durch die schräge Lage des Moduls und der Rückwand entsteht bei Anströmung durch Wind eine Anpresswirkung, die die Modulreihen gegen das Dach drückt. Um das Umkippen und Abheben der einzelnen Modulreihen zu verhindern werden die Modul-

reihen mit sogenannten Koppelprofilen miteinander verbunden. In Randbereichen, wo die maximalen Windlasten (Sogspitzen) auf Flachdächern entstehen, wird gegeben falls gezielt punktuell Beschwerung angeordnet, um das Verschieben zu verhindern.

2.2.3 Aufständering

Stütz und Trägerprofilschienen

Eine weit verbreitete Methode ist die Aufständering mit Profilschienen aus der Schrägdachmontage oder mit Winkelprofilen. Die Schienen werden entweder vor Ort zugeschnitten und zu Dreiecken zusammen geschraubt oder aber unter Werkstattbedingungen vorkonfektioniert. Der Vorteil ist, dass das System individuell an die vorhandenen Anforderungen angepasst werden kann. Module können dadurch längs, quer oder, wenn erforderlich, in mehreren Lagen übereinander aufgestellt werden. Nachteile sind der hohe Materialeinsatz sowie lange Montagezeiten.

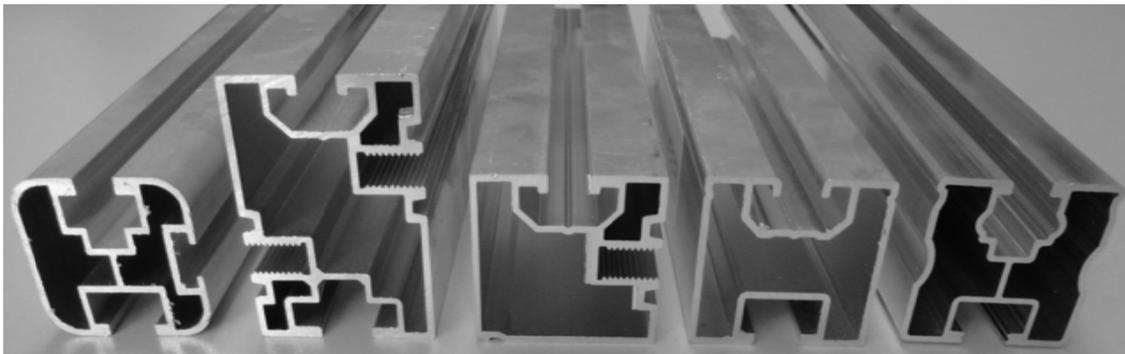


Bild 2.8: Trägerprofilschienen für Module (Div. Hersteller)

Stützwinkel

Dabei handelt es sich um vorkonfektionierte Dreiecke mit optimierten Querschnitten. Dadurch wird Montagezeit sowie Materialkosten minimiert. In Abhängigkeit vom Einsatzgebiet können weitere Materialeinsparungen vorgenommen werden (vgl. Bild 2.9 a) und b)). Module, die eine tragende Funktion übernehmen, können direkt an den Stützwinkel befestigt werden. Bei Modulen mit schwachen Rahmen werden unterstützend Längsprofile angebracht, an denen die Module anmontiert werden.

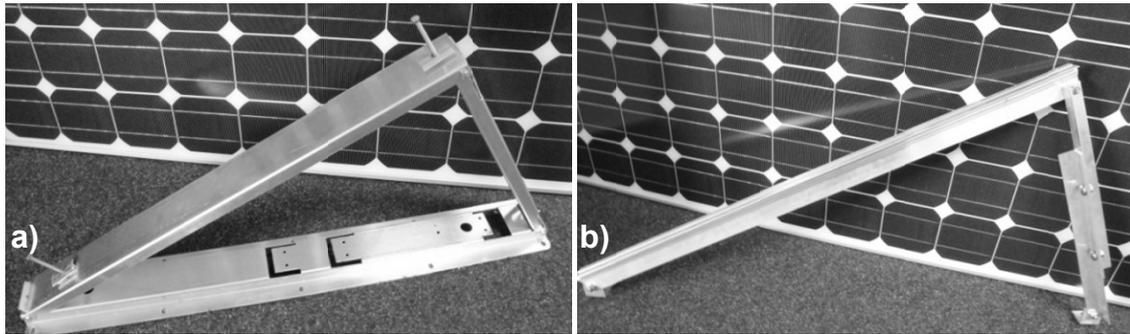


Bild 2.9: Winkelstütze für a) Folindächer und b) Profilblechdächer

Wannen

Bestehend aus UV-beständigem Kunststoff oder Faserzement, werden Wannen auf Flachdächer gestellt. Einsatzgebiet sind Dächer mit Kiesschüttungen sowie Dächer mit Dichtungen. Diese Systeme basieren auf dem Schwerlastverfahren. Sie sind somit nur für Dächer mit hohen Lastreserven geeignet ($90\text{-}125\text{kg/m}^2$). Die Ballastierung wird in das Innere der Wannen eingelegt und ist somit nicht sichtbar. Module können direkt an den Wannen befestigt werden.

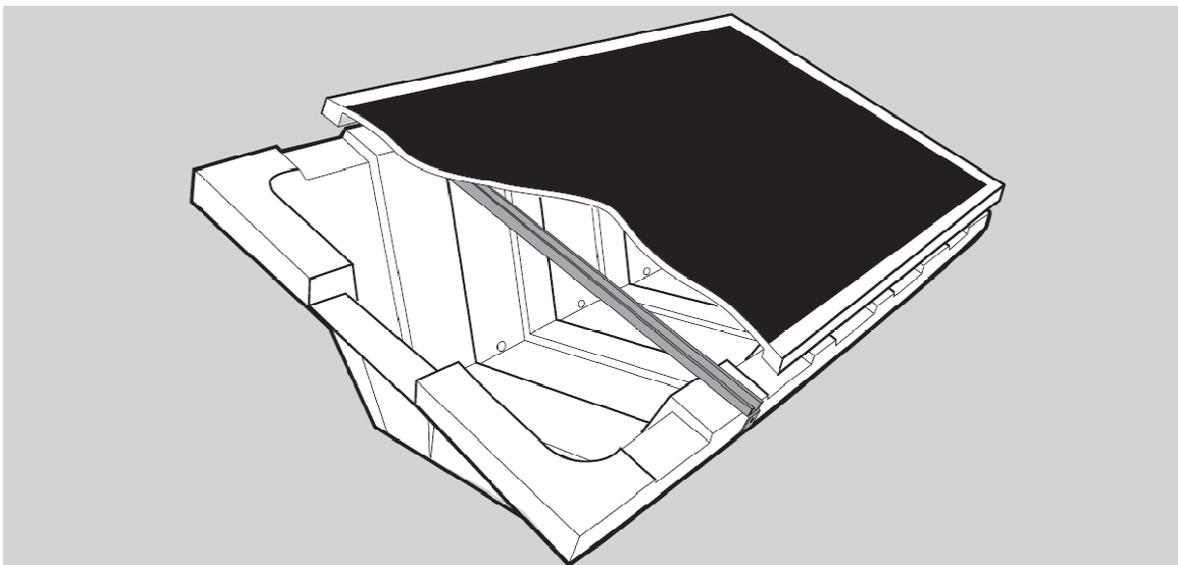


Bild 2.10: Wannen-System (ConSole von Renusol)

Sockel

Diese sind meistens aus Beton gefertigt und können dadurch zwei Funktionen vereinen: Stützung und Ballastierung. Das hohe Eigengewicht der Stützelemente führt zu Schwierigkeiten beim Transport auf dem Dach.

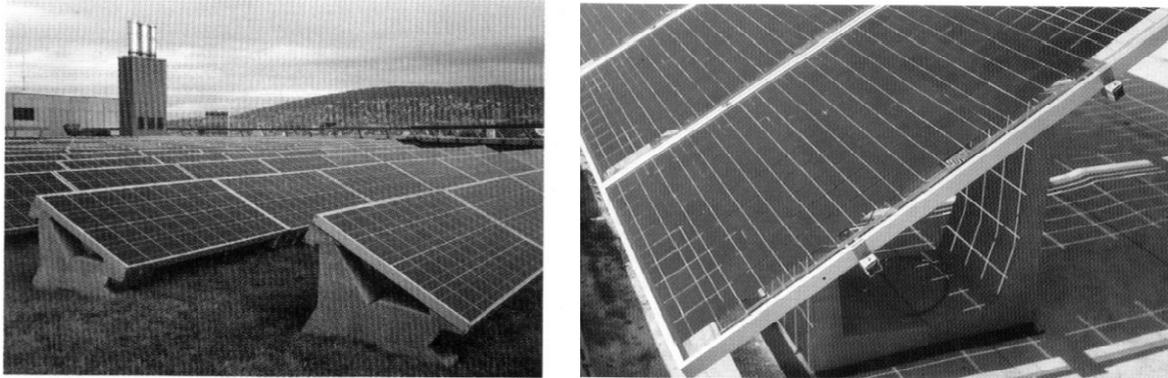


Bild 2.11: Sockelsysteme

Modulbefestigung

Die Module werden an Modulträgerprofilen, Stützen, Wannen oder Sockel befestigt. Klemmen und formschlüssiges Einlegen der Module sind die gängigen Arten der Befestigung. Bei geklemmten Modulen ist die Position der Klemmpunkte mit dem Modulhersteller abzustimmen, um Schäden an den Modulen zu vermeiden.

punktförmig geklemmt

Über beidseitige Mittelklemmen zwischen zwei Modulen und einseitige Endklemmen am Anfang und Ende eines Strings werden die Module mittels Nutensteinen und Hammerkopfschrauben an Profilschienen geklemmt. In Abhängigkeit der Modulrahmentiefe wird die Schraubenlänge bzw. Klemmenhöhe gewählt. Form und Abmessungen sind vom Hersteller abhängig. Bei der Montage sollte ein Drehmomentschlüssel verwendet werden. Zu stark angezogene Schrauben können zu Beschädigungen des Moduls führen. Bei zu schwach angezogenen Schrauben kann das Modul verrutschen.

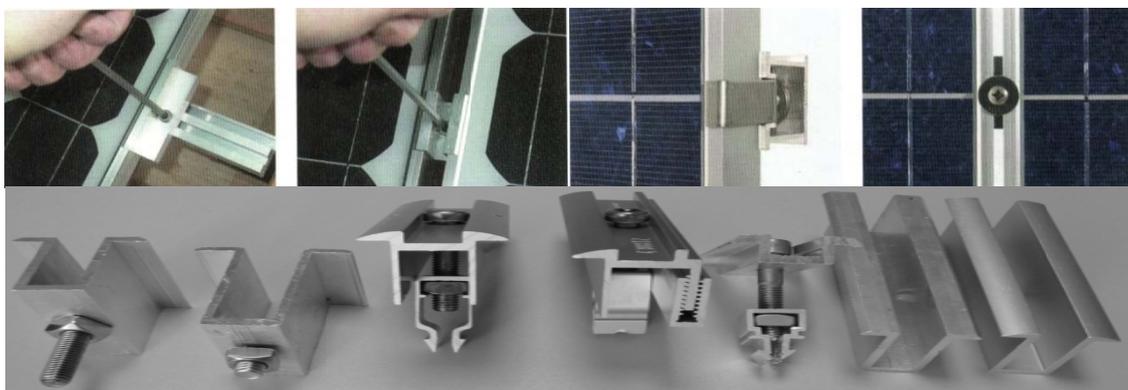


Bild 2.12: End- und Mittelklemmen für PV-Module (DGS, 2008)

linienförmig geklemmt (Klemmleisten)

Anstelle von punktuellen Klemmen werden bei dieser Variante die Module mit durchgehenden Klemmleisten verwendet. Einer einfacheren Montage und besseren Optik steht eine aufwändigere und kostenintensivere Unterkonstruktion gegenüber. Es werden zwei durchgehende Modulträgerleisten benötigt, an denen die Klemmleiste befestigt werden kann.

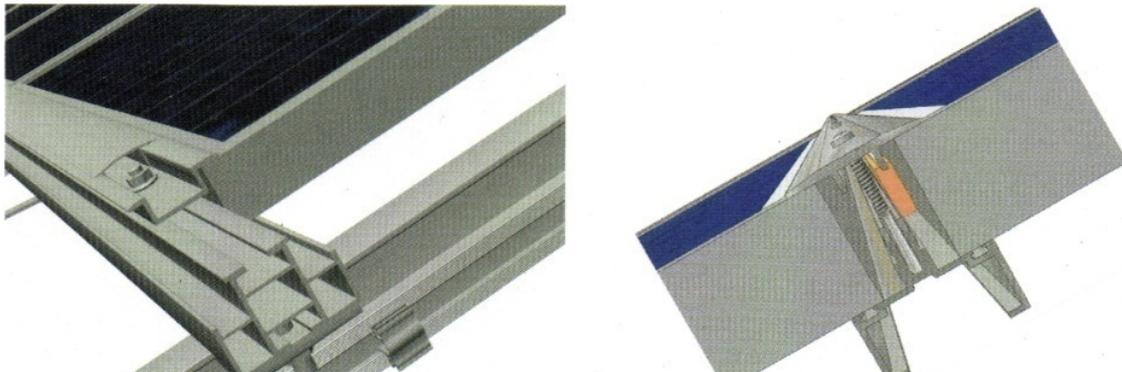


Bild 2.13: Klemmleisten für PV-Module ([7])

formschlüssig eingelegt

Hier werden die Module in Führungsprofile ohne Klemmung eingelegt. Sie halten sich durch ihr Eigengewicht und Reibung im Profil. Die Profile haben eine U-Form, so dass die Module nicht aus dem Profil rutschen können. Bei der Modulmontage werden keine zusätzlichen Werkzeuge benötigt. Da Module und Profile in einer Ebene liegen, ist eine gute Hinterlüftung gegeben.



Bild 2.14: Einlegesystem (Phoenix-Solar)

2.3 Modulabschattung

Grundsätzlich könnten Module horizontal montiert werden. Da jedoch der höchste Ertrag bei optimaler Ausrichtung zur Sonne erzielt wird (vgl. Kap. 4.2.2), werden Module geneigt montiert. In Berlin z.B. erhöht die Aufständering der Module auf 30 ° den Ertrag um 12,5 % [4]. Ein weiterer positiver Effekt der geneigten gegenüber der flachen Anordnung ist der Selbstreinigungseffekt bei Regen. Verluste infolge Verschmutzungen durch Laub, Vogelextremite und Staub können so reduziert werden. Eine Aufständering der Module bringt jedoch einen wesentlichen Nachteil mit sich. Bei hintereinander aufgeständerten Modulen kommt es zur gegenseitigen Abschattung. Bei Abschattungen von Generatoren sind die Leistungsverluste näherungsweise proportional zu den Verlusten an den am meisten betroffenen Zellen. Module werden in der Regel parallel zu Strings miteinander verschaltet. Wird eine Zelle verschattet, wirkt sich das auf die Leistungsfähigkeit des gesamten Strings aus. Das Bild 2.15 zeigt die Zusammenhänge zwischen Modulneigungswinkel, Abschattungswinkel und dem Modulreihenabstand.

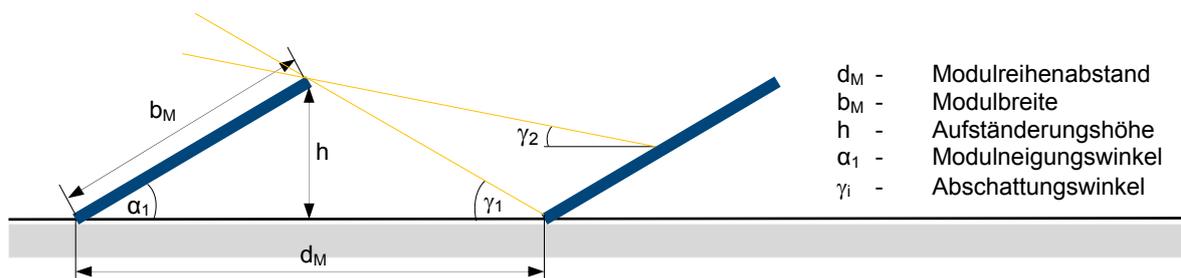


Bild 2.15: Geometrische Verhältnisse bei aufgeständerten Modulen

Der Flächennutzungsgrad ist das Verhältnis von Modulbreite zum Modulreihenabstand (vgl. Gl. [2.1]) und gibt somit an wie effizient die Dachfläche ausgenutzt wird. In Deutschland hat sich ein Modulneigungswinkel von 30 ° bewährt. Dies entspricht einer Flächennutzung von etwa 34 %. Soll die Dachfläche effizienter genutzt werden, muss der Modulreihenabstand kleiner werden. Daraus resultiert ein flacherer Modulneigungswinkel, um die Abschattungsverluste so gering wie möglich zu halten.

$$f = \frac{b_M}{d_M} \times 100 \quad [\%] \quad [2.1]$$

Für den Modulreihenabstand ergibt sich eine geometrische Abhängigkeit (vgl. Gl. 2.2) zwischen Modulbreite, Abschattungswinkel (Sonnenstand) und MNW. Die Gleichung für den Modulreihenabstand wird mit Hilfe von Bild 2.15 aufgestellt.

$$d_M = b_M \times \frac{\sin(180 - \alpha_1 - \gamma_i)}{\sin \gamma_i} \quad [m] \quad [2.2]$$

Da der Sonnenstand und somit der Abschattungswinkel über das Jahr und die Tageszeit variiert, kann die Abschattung nicht vollständig ausgeschlossen werden. Bei Auslegungen von Anlagen wird als Richtwert ein Abschattungswinkel der Mittagssonne am 21.12 verwendet (z.B. Bremen $\gamma_1 = 13,5^\circ$). An diesem Tag hat die Sonne den niedrigsten Stand im Jahr. Abhängig vom Breitengrad variiert dieser Richtwert (vgl. Bild 2.16).

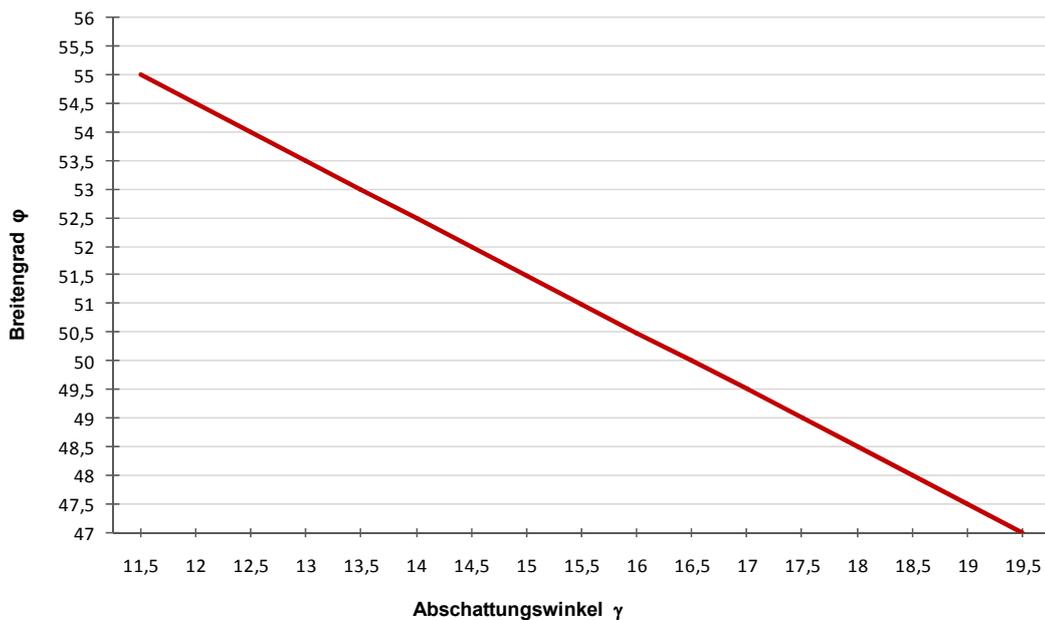


Bild 2.16: Abschattungswinkel in Abhängigkeit vom Breitengrad

2.4 Baurechtliche Einordnung von PV - Anlagen

„Photovoltaikanlagen sind bauliche Anlagen im Sinne des Baurechts. Darunter versteht man alle mit dem Erdboden verbundenen, aus Bauprodukten hergestellten Anlagen. Dabei reicht es aus wenn die Photovoltaikanlage auf oder an einem Gebäude angebracht ist, also ...nur „mittels“ einer anderen baulichen Anlage mit dem Erdboden verbunden ist“ [16]. Somit sind bei der Planung und Ausführung

von Photovoltaikanlagen alle baurechtlichen Vorschriften zu beachten. Das Baurecht ist eine relativ komplizierte und umfangreiche Rechtsmaterie, deshalb kann nachfolgend keine erschöpfende Darstellung aller baurechtlichen Regelungen erfolgen. Es werden nur die wesentlichen Regelungen hervorgehoben, die den Aufbau von PV-Anlagen auf Flachdächern tangieren.

Bezogen auf PV-Anlagen gliedert sich das Baurecht in die Anwendungsbereiche: formalrechtliche und materiellrechtliche Anforderungen (vgl. Bild 2.17). Die formellrechtlichen Anforderungen umfassen die Baugenehmigung und die verwendeten Bauprodukte und Bauarten. Materiellrechtliche Anforderungen gliedern sich in das Bauplanungs-, Bauordnungs-, und Baunebenrecht.

Grundsätzlich sind folgende Fragestellungen zu klären:

- ◆ Ist eine Baugenehmigung erforderlich oder ist die Anlage genehmigungsfrei? Falls eine Baugenehmigungspflicht besteht, welche ist es?
- ◆ Entspricht die Anlage als Ganzes dem materiellen Baurecht?
- ◆ Dürfen die einzelnen Bauprodukte verwendet werden oder ist eine besondere behördliche Zulassung erforderlich?

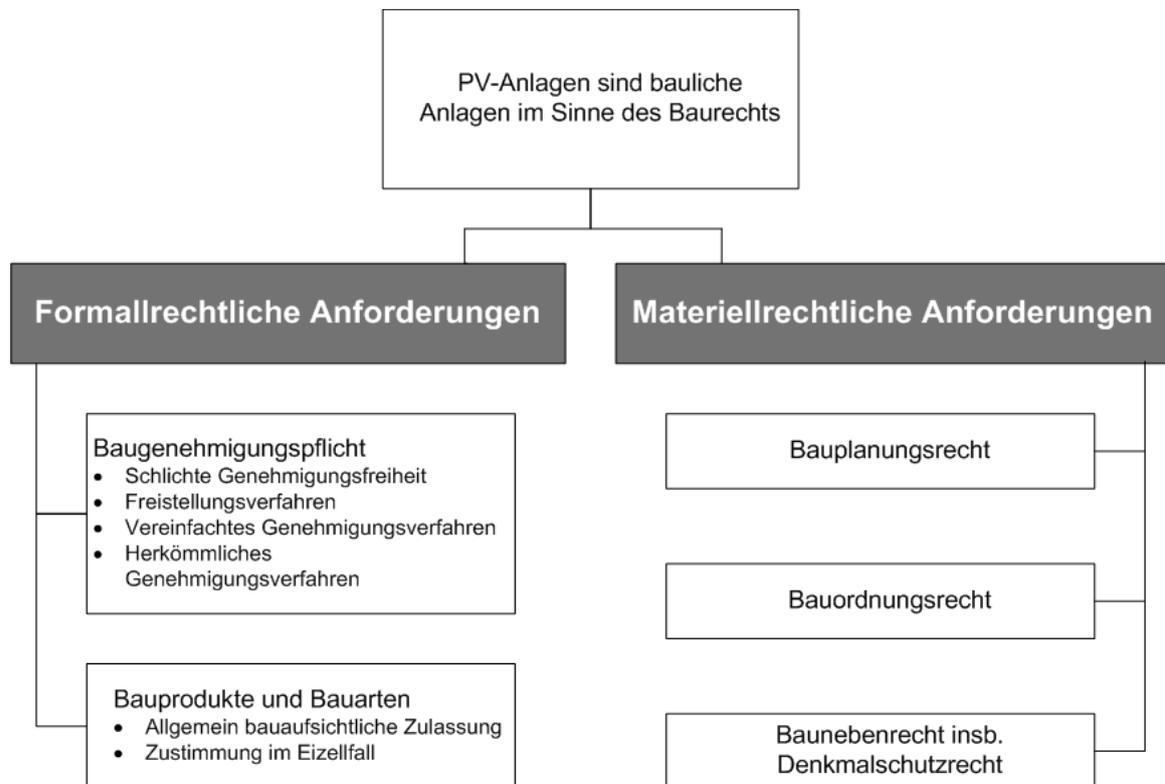


Bild 2.17: Rechtliche Anforderungen beim Bau von PV-Anlagen [16]

Baugenehmigung

Das Bauordnungsrecht sieht die im Bild 2.17 dargestellten Genehmigungsverfahren. „Der Großteil der Photovoltaikanlagen ist „schlicht“ genehmigungsfrei. Bei der „schlichten“ Genehmigungsfrei benötigt der Bauherr keine Bauvorlagen (Lageplan, Bauzeichnungen, bautechnische Nachweise etc. vgl. BauVorIVO) und somit auch keine bauvorlagenberechtigte Personen. Es muss kein Antrag gestellt werden und auch keine Anzeige bei der Gemeinde eingehen. Die „schlichte“ Genehmigungsfreiheit in den einzelnen Bundesländern mit unterschiedlichen Reichweiten geregelt. Eine tabellarische Übersicht der Regelungen kann in [16], Seite 7 eingesehen werden.

Genehmigungsfreiheit bedeutet jedoch nur, dass die Baubehörde die bauliche Anlage nicht auf Ihre Zulässigkeit prüft. Die Verantwortung über die Erfüllung der Forderungen des materiellen Baurechts muss der Bauherr selbst tragen. „Ist das Bauvorhaben genehmigungsfrei, ist für die Einhaltung der baurechtlichen Vorschriften ausschließlich der Bauherr verantwortlich“ [16]. Erfüllt der Bauherr seine Pflicht nicht (z.B. indem die Statik nicht stimmt), und ist dadurch die öffentliche Sicherheit gefährdet, darf die Behörde unter Anordnung eines Zwangsgeldes die Beseitigung fordern.

Ist die PV-Anlage nicht genehmigungsfrei, muss der Bauherr entweder ein Freistellungs-, ein Anzeige- bzw. ein Kenntnissgabeverfahren durchlaufen. „Praktisch alle Bundesländer haben in den letzten Jahren diese Sonderverfahren für Wohngebäude bis zu einer bestimmten Größenordnung eingeführt. Obwohl diese Verfahren in erster Linie die Errichtung solcher Wohngebäude betreffen, kann auch der Einbau von Photovoltaikanlagen darunter fallen, da auch Änderungen dieser Gebäude erfasst werden“ [16]. Das vereinfachte sowie das herkömmliche Genehmigungsverfahren finden in den meisten Bundesländern keine Anwendung bei Aufdachanlagen.

Für die Klärung der Frage welches Verfahren eingehalten werden muss und welche Bauvorlagen einzureichend sind sollte die zuständige Bauaufsichtsbehörde in dem entsprechenden Bundesland kontaktiert werden. Eine Übersicht der Bauaufsichtsbehörden kann in [16] Seite 30 eingesehen werden.

Bauprodukte

Das Baurecht regelt auch die Gefahrenabwehr. Gefahr kann dadurch entstehen dass nicht geeignete Bauprodukte verwendet wurden. Die LBO's regeln die gesetzlichen Bestimmungen für Bauprodukte.

Bauprodukte sind Baustoffe, Bauteile, und Anlagen die hergestellt werden, um dauerhaft in baulichen Anlagen eingebaut zu werden.

„Bauprodukte dürfen im Grundsatz bei der Errichtung und der Änderung baulicher Anlagen nur verwendet werden, wenn sie abstrakt geeignet sind, die jeweils an sie gestellten Anforderungen zu erfüllen (Verwendbarkeitsnachweis) und wenn sichergestellt ist, dass das jeweilige Bauprodukt – konkret – mit diesen Anforderungen übereinstimmt (Übereinstimmungsnachweis)“ [16].

Das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) führt gemeinsam mit der obersten Bauaufsichtsbehörde der Länder die Bauregelliste (BRL) ein. Anhand dieser Liste unterscheidet die LBO Bauprodukte in vier Kategorien (vgl. Tabelle 2.4).

Tabelle 2.4: Unterteilung von Bauprodukten nach der LBO in der BRL

<p>Geregelte Bauprodukte</p> <p>Geregelte Bauprodukte weichen nicht oder nicht wesentlich von den Produktnormen der BRL A Teil 1 ab. Ihr Hersteller zeichnet sie mit einem so genannten Übereinstimmungszeichen (Ü-Zeichen aus).</p> <p>Nach harmonisierten europäischen Normen oder mit einer europäischen Technischen Zulassung</p> <p>Dies sind CE- gekennzeichnete Bauprodukte, die nach europäischen Vorschriften in den Umlauf gebracht werden dürfen. Sie sind in der BRL B gelistet. In Deutschland gelten diese Produkte als nicht geregelt, außer sie genügen nationalen Anwendungsnormen.</p> <p>Sonstige Bauprodukte</p> <p>Aufgrund ihrer Sicherheitstechnischen Relevanz werden diese Bauprodukte nicht in der BRL A geführt, obwohl es anerkannte Regeln der Technik wie z.B. DIN-Normen gibt.</p> <p>Nicht geregelte Bauprodukte</p> <p>Diese Bauprodukte weichen entweder wesentlich von Technischen Baubestimmungen ab oder für sie existieren keine anerkannten Regeln der Technik. In der Regel benötigen sie kein Verwendbarkeitsnachweis.</p>

PV-Module auf oder in Dächern mit mechanischer Befestigung, die keine weiteren konstruktiven und sicherheitstechnischen Funktionen zu erfüllen haben, gelten als sonstige Bauprodukte¹. Sonstige Bauprodukte haben keine sicherheitstechnische Bedeutung und benötigen deshalb keinen Verwendbarkeitsnachweis². Die Produk-

¹ Vgl. Beschluss der Fachkommission Bautechnik vom 20./21.06.2001.

² Verwendbarkeitsnachweise sind: allgemeinen bauaufsichtliche Zulassungen, allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnisse sowie Zustimmung im Einzelfall (umgangssprachlich können diese als „amtliche Einbauanleitungen“ umschrieben werden), soweit es sich um Bauprodukte handelt.

te müssen jedoch den Materialanforderungen hinsichtlich Standsicherheit, ausreichende Dauerhaftigkeit und Brandschutzaufgaben genügen. Diese sind in den jeweiligen technischen Baubestimmungen geregelt.

Bauplanungsrecht

Jede bauliche Anlage muss dem Bauplanungsrecht entsprechen. Das Bauplanungsrecht ist recht umfangreich. Grundsätzlich hängt es davon ab, in welchem Bereich die Anlage fällt. Das Baugesetzbuch unterscheidet zwischen:

- ◆ Geltungsbereich eines qualifizierten Bebauungsplans
- ◆ Innenbereich
- ◆ Außenbereich

Der Bebauungsplan kann Festsetzungen enthalten, die durch den nachträglichen Bau einer PV-Anlage berührt werden. Bei aufgeständerten Aufdachanlagen kann z.B. die festgesetzte maximale Gebäudehöhe überschritten werden. Der Bebauungsplan regelt ebenfalls die Art der Nutzung (Wohnen, Gewerbe, Industrie usw.) eines Gebietes. Problematisch wird es bei größeren PV-Anlagen in reinen Wohngebieten, bei denen von Gewinnerzielungsabsichten auszugehen ist. Hier kann vom Ordnungsamt die Anmeldung eines Gewerbes vorgeschrieben werden. Der Betreiber sollte sich jedoch im Klaren sein, dass in reinen Wohngebieten ein Gewerbe nicht zulässig ist.

Bauordnungsrecht

In Deutschland obliegt die Bauordnung den Ländern. Die Vorschriften der Landesbauordnungen (LBO) stimmen jedoch weitestgehend mit der Musterbauordnung (MBO), die auf die Bauministerkonferenz zurück geht, überein. Für die Errichtung von PV-Anlagen sind in den meisten Bundesländern Sonderregelungen formuliert worden. Die MBO fordert in ihrem Grundsatz „Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden“ § 3 MBO [10]. Mit diesem Paragraphen fordert der Gesetzgeber, dass jede bauliche Anlage im Ganzen sowie in ihren Einzelteilen standsicher ist. Diese Forderung wird über einen Standsicherheitsnachweis gewährleistet. Beim Freistellungsverfahren und dem vereinfachten Genehmigungsverfahren muss der Bauherr über diese Nachweise verfügen. Bei der „schlichten“ Genehmigungsfreiheit ist dieser Nachweis zwar behördlich nicht erforderlich, der Bauherr sollte jedoch die Standsicherheit in ausreichender Weise dokumentieren.

(wird z.B. ein Mensch durch das Versagen einer PV-Anlage verletzt, ist der Nachweis haftungsrechtlich vorteilhaft.)

Allgemeine Rechtssprechungen

Weiter sind für die Planung, Leitung und Ausführung von PV-Anlagen allgemein geltende Gesetze und Verordnungen zu nennen. Sie definieren die Verantwortung der Personen, die PV-Anlagen auf Ihrem Gebäude realisieren.

Bürgerliches Gesetzbuch

“Wer vorsätzlich oder fahrlässig das Leben oder die Gesundheit, die Freiheit, das Eigentum oder ein sonstiges Recht eines anderen widerrechtlich verletzt, ist dem anderen zum Ersatz des daraus entstehenden Schadens verpflichtet” § 823 BGB [12].

Strafgesetzbuch

“Ebenso wird bestraft, wer in Ausübung eines Berufs oder Gewerbes bei der Planung, Leitung oder Ausführung eines Vorhabens, technische Einrichtungen in ein Bauwerk einzubauen oder eingebaute Einrichtungen dieser Art zu ändern, gegen die *allgemein anerkannten Regeln der Technik* verstößt und dadurch Leib oder Leben eines anderen Menschen gefährdet“. Weiter heißt es „Wer die Gefahr fahrlässig verursacht, wird mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder mit Geldstrafe bestraft. Wer in den Fällen der Absätze 1 und 2 fahrlässig handelt und die Gefahr fahrlässig verursacht, wird mit Freiheitsstrafe bis zu zwei Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.“ § 319 StGB [13].

3 Marktanalyse

Die Marktanalyse soll einen Überblick über bereits am Markt vorhandene Montagesysteme im Bereich Flachdach als Aufdach-Installation geben. Basierend auf Vorgaben von SIG-Solar sind Systemanforderungen erarbeitet worden (vgl. Kap. 4.1 [a-l]). Ein windoptimiertes, befestigungsloses Montagesystem wird diesen Anforderungen am ehesten gerecht. Deshalb beschränkt sich die Marktanalyse auf solche Montagesysteme. Derzeit sind diese Systeme nur begrenzt auf dem Markt erhältlich, sodass sich die Marktanalyse auf sieben ausgewählte Systeme beschränkt. Herstellerspezifische Daten werden nicht angegeben.

Derzeit sind über hundert Systeme für den Bereich Flachdach auf dem Markt erhältlich. Windoptimierte Systeme stellen hiervon aber nur einen kleinen Teil dar. Aktuelle Zusammenstellungen erhältlicher Systeme können unter anderem in renommierten Fachzeitschriften eingesehen werden [14], [15]. Um detailliertere Angaben zu bekommen, wurden verschiedene Hersteller direkt angeschrieben.

Die Ergebnisse und wesentlichen Erkenntnisse aus der Analyse sind am Ende des Kapitels zusammengefasst.

3.1 Kriterien für die Analyse

Für die Analyse wurde ein Fragebogen entwickelt und an die ausgewählten Systemhersteller verschickt. Folgende Fragestellungen sollten beantwortet werden:

1. Seit wann ist das System auf dem deutschen Markt erhältlich?
2. Für welche Dachhautarten ist das System geeignet: Dachdichtung: Bitumen, Folie; Trapezblech; Gründach; Kies; Blecheindeckungen; Wellblech?
3. Wie hoch ist das Eigengewicht des Systems bezogen auf die Modulfläche?
4. Auf welchen Materialien basiert das System?
5. Durch welche konstruktiven Maßnahmen werden die Windkräfte beherrscht?
 - ◆ Auflast
 - ◆ Kopplung der einzelnen Modulreihen
 - ◆ Windoptimierte Form
 - ◆ Dachanbindung
6. Für welche maximalen Modulabmessungen ist das System verfügbar?
7. Welche Modulneigungswinkel können realisiert werden?
8. Wie werden die Module an das Gestell befestigt?
9. Bis zur welchen Dachneigung darf das System eingesetzt werden?
10. Was ist die maximal zulässige Gebäudehöhe, Wind- und Schneelastzone?
11. Was ist die geschätzte Montagezeit pro kWp?
12. Wie ist das System zertifiziert?
13. Wie lang ist der Garantiezeitraum?
14. Was ist die geschätzte Preisspanne pro kWp?

3.2 Systembeschreibung

Tabelle 3.1: Beschreibung der Funktionsweise der 10 Montagesysteme

<p>System 1:</p> <p>Pro Modul werden zwei Dreieckstützen aus verzinktem Stahl benötigt. Diese werden auf kreisförmigen Fußplatten aufgelagert. Durch Antirutschmatten unterhalb der Fußplatten wird das Gleiten verhindert. In den Dreieckstützen sind Halterungen für die Auflast angeordnet, in die Standard Gehwegplatten eingelegt werden können. Das Modul wird direkt an den Dreieckstützen befestigt, so dass keine zusätzlichen Modulschienen benötigt werden. Durch seitliches Verschieben der Dreieckstützen können die Module in einem vom Hersteller vorgeschriebenem Bereich fixiert werden. Durch die seitliche und rückwärtige Verkleidung mit Blechelementen entsteht eine günstige aerodynamische Form. Die einzelnen Modulreihen können mit zusätzlicher Profilen untereinander gekoppelt werden.</p>	
<p>System 2:</p> <p>Dieses System ist in zwei Varianten, als Standard und light erhältlich. Das Hauptelement beider Varianten ist ein leichtes, Ständerdreieck. Die einzelnen Schenkel sind klappbar miteinander verbunden und werden vor Ort mittels einer Schraube zu einem Dreieck geschraubt. Die Module werden quer auf den Dreiecken platziert und über Klemmen fixiert. Mittelklemmen erlauben es zwei Module an einem Ständer zu befestigen. In der Standardvariante erfüllt der Ballast zwei Funktionen: Lagesicherung und Windstopp. Die Ballastplatten werden rückseitig auf Winkel gelegt. In der Lightvariante werden anstatt der Platten Bleche an die Ständer geschraubt. Abhängig von Modulwinkel kann zusätzlicher Ballast horizontal, innen liegend eingelegt werden. Für zusätzliche Aussteifung sogen Koppelprofile die durchgehend unterhalb der Dreiecke platziert. Alle Elemente die mit der Dachhaut kontakt haben sind mit Antirutschmatten ausgestattet.</p>	
<p>System 3:</p> <p>Gekantete Blechelemente bilden die Basis. Die Elemente werden durch Nietverbindungen miteinander verbunden. Die Module können auf der kurzen Seite entweder geclippt oder geklemmt werden. Windleitschlitz ober und unterhalb des Moduls sorgen für eine Hinterlüftung der Module. Durch die seitliche Öffnung können die Kabel geführt werden.</p>	

System 4:

Das System basiert auf gekanteten Aluminiumblechen. Führungsprofile, die auf eine Antirutschmatte auf das Dach gelegt werden, definieren in Abhängigkeit der Modulbreite den Ständerabstand. Das durchlaufende Profil verbindet die einzelnen Modulreihen miteinander. Die Blechständer werden in einem definiertem Abstand in das Führungsprofil eingelegt und mit diesem verschraubt. Zwei Module können mittels Modulklemmen auf den z-förmigen Ständern befestigt werden. Für die aerodynamische Form sorgen Endhauben sowie rückwertige Bleche. Je nach Anforderungen (Dachrand) können die Bereiche in der Nähe des Dachrandes beschwert werden.



System 5:

Das besondere Merkmal dieses Systems ist die stufenlose Verstellbarkeit des MNW. Modulträgerprofile in Modul-längsrichtung sowie das rückseitige Windleitblech sind über gelenkige Auflagerpunkte miteinander sowie mit einem Führungsprofil verbunden. Das Führungsprofil leitet die Lasten ins Dach ein und dient sogleich als Kopplung der einzelnen Modulreigen. Das System kommt ohne Seitenbleche aus.



System 6:

Das System besteht im Wesentlichen aus gekanteten und gefrästen Blechelementen. Das Führungsprofil verfügt über eine breite Auflagerfläche, in das Beschwerungselemente nach Bedarf eingelegt werden können. Dadurch entstehen auf dem Dach Linienlasten in den Bereichen wo beschwert wird. Die Module werden auf Trägerprofilen aufgelegt und befestigt. Die Profile verlaufen in Modul-längsrichtung. Seitlich sind Bleche angeordnet worden.



System 7:

Dieses System basiert auf gekanteten Blechelementen. Die Module werden auf Modulstützen an der kurzen Seite aufgelagert und aus Auflagerschienen geklemmt. Müssen die Module an einem vorgegebenem Abstand geklemmt werden können zusätzliche Klemmschienen angebracht werden. Die Stützen werden auf Stützfüßen befestigt, an die auch die Koppelprofile (Flachblech durchlaufend) geschraubt werden. Die Koppelprofile werden nur punktuell aufgelagert, dadurch ist der Abfluss von Wasser gewährleistet. Das gesamte System wird durch Bleche geschlossen. Für die Modulbelüftung sorgen Lüftungsschlitze ober und unterhalb des Moduls. Durch punktuelle Auflagerung ist der Wasserabfluss gewährleistet. Im Randbereich ist eine zusätzliche Belastung von ca. 10 – 15 kg / Randmodul erforderlich. Die Kabel werden in einem zusätzlichen Kabelkanal geführt. Vorderseitig werden die Module angehoben um den Verschmutzungsgrad zu minimieren.



3.3 Übersicht der Systemdaten

Tabelle 3.2: Zusammenstellung der Ergebnisse aus der Marktanalyse

Systemnummer	Markteinführung	System						Modul					Montage					Sonstiges		
		Geeignet für Dachhauttyp	Eigengewicht bezogen auf die Modulfläche	Material der Hauptkomponenten	Standsicherheit			max. Breite	max. Länge	Anordnung	Modulneigungswinkel	Befestigungsart der Module	max. Dachneigung	max. Gebäudehöhe	max. Windlastzone	max. Schneelastzone	Zeit	Zertifikate	Garantie	Preis
					Auflast	Kopplung	windoptimiert													
System 1	k.A.	Fo, Bi	k.A.	Vz, VA, Al	X	X	X	k.A.	k.A.	k.A.	25	kl	2 - 3	k.A.	alle	k.A.	k.A.	W	k.A.	k.A.
System 2.1	2008	alle	11	Al, VA	X ¹	-	X	1000	2000	quer	13, 15,	kl	5	alle	alle	alle	1-2	keine	20	270-320
System 2.2	2008	alle	9,5	Al, VA	-	X	X	1000	2000	quer	20, 30	kl	5	alle	alle	alle	1-2	keine	20	250
System 3	2010	alle	7	Al	-	X	X	1000	2000	quer	15, 17, 20	Klick, kl	20	k.A.	k.A.	k.A.	2,5	-	5	270
System 4	2009	Fo, Bi, Ki, Tb	9,8	Al	X	X	X	1691	1002	quer	20	kl	5	i.d.R 20	III	k.A.	k.AW	TÜV, W	10	260-360
System 5	2008	alle	ca. 4	Al	-	X	X	1100	beliebig	quer	20, 25, 30	kl	10	k. A.	IV ²	III ³	4-5 /kWp	TÜV, W	k. A.	k. A.
System 6	2009	Fo, Bi, Ki, Gd, Tb	11,5	Al, VA	X ¹	X	X	768	1020	quer	12,20	kl	5	10	II	III	2,5-3/kWp	LGA, W	10	290-410
System 7	2009	Fo, Bi, Ki, Gd, Tb	9	Al, VA	-	X	X	beliebig	beliebig	quer	10, 15	kl	10	36	k.A.	k.A.	2,5	IFI, W	5	ca. 430

WLZ Windlastzone

Fo Folie

Bi Bitumen

Gd Gründach

Ki Kiesdach

Se Sandwichelemente

Tb Trapezblech

Be Blecheindeckung

We/Wb Welleternit/Wellblech

EI einlegen

kl klemmen

Al Aluminium

Vz Verzinkter Stahl

VA Edelstahl

i.n.R. in der Regel

k.A. keine Angaben

W Windkanaltests

¹ ggf. zus. Auflast in Abhängigkeit vom Standort und Gebäudehöhe

² In Randbereich je nach WLZ

³ Mit Prüfung

3.4 Auswertung der Systemdaten

Die Marktanalyse zeigt, dass windoptimierte, lastarme Aufständersysteme im Bereich Flachdach eine noch recht junge Entwicklung darstellen und erst seit etwa zwei Jahren auf dem Markt angeboten werden. Sie eignen sich für fast alle Dachdichtungen, und Dachdeckungen die im Bereich Flachdach vertreten sind. Ihr Eigengewicht liegt im Bereich von 7 – 11 kg pro Quadratmeter Modulfläche. Als Material wird hauptsächlich Aluminium verwendet. Die Bauteile werden entweder als Kombination aus Profilen und Blechen oder als reine Blech-Konstruktion angeboten. Um die Langlebigkeit dieser Systeme zu garantieren werden die Verbindungsmittel in Edelstahl ausgeführt.

Um die Flächenlast, die zusätzlich auf das Dach gebracht wird, so gering wie möglich zu halten, bringen die Systemhersteller seitlich sowie hinten Windleitbleche an und verbinden die einzelnen Modulreihen mit Koppelprofilen. Bei einigen Systemen ist eine minimale zusätzliche Beschwerung in den Randbereichen dennoch notwendig. Dies wird mit den auftretenden hohen Windverwirbelungen in den Eckbereichen von Flachdächern begründet [VI]. Die zusätzliche Last wird anhand einer Projektstatik, in Abhängigkeit vom Standort, Gebäudehöhe sowie der Geometrie des Dachrandes ermittelt.

Bei allen Systemen werden die Module quer (liegend) aufgeständert. Die meisten Systemhersteller begrenzen die zulässigen Modulabmessungen. Die Systeme sind für die MNW $\alpha_1 = 10, 12, 15, 17, 20, 25$ und 30° konzipiert, wobei die meisten Hersteller nur zwei bis maximal drei der MNW bedienen. Der MNW 30° wird ohne zusätzliche Beschwerung jedoch nur durch das System 7 geboten. Mit 20° Neigung sind 5 der 7 Systeme erhältlich. In fast allen Fällen werden die Module punktförmig durch Modulklemmen am Gestell befestigt.

In der Regel können die Systeme auf Dächern mit Dachneigungen bis zu $\Phi = 10^\circ$ aufgestellt werden. Das System 5 ist das einzige das auch für Dächer mit $\Phi = 20^\circ$ geeignet ist. Wobei bei dieser Neigung Befestigungen an der Dachkonstruktion notwendig sind.

Hinsichtlich der maximalen Belastungen der Systeme sowie der Aufstellgebiete, die aus der zulässigen Schnee-, Windlastzone sowie der Gebäudehöhe resultieren, ist eine Aussage schwer zu treffen. Die Angaben variieren sehr stark. Einige Hersteller treffen Einschränkungen, andere wiederum lassen ihr System für alle Lastzonen zu.

Bei den meisten Systemherstellern ist die Sicherheit ein wesentliches Verkaufsargument. Um die vom Gesetzgeber geforderte Sicherheit (vgl. Kap. 2.4) dem Kunden zu gewährleisten, werden Sicherheitstechnische Untersuchungen bei namenhaften Prüf- und Zertifizierungsinstituten (TÜV, VDE) sowie Versuche im Windkanal durchgeführt.

Die Systempreise sind bei Aufständungen dieser Art schwer zu pauschalieren. Projektbezogene Angaben können einen großen Einfluss auf den Gesamtpreis haben. Die Anzahl der Seitenbleche (vgl. System 1, 4, 6, 7) ist u.a. von der Anzahl der Modulreihen abhängig. Dies hängt wiederum von dem Seitenverhältnis des Daches und der Ausrichtung der Module ab. Aus diesem Grund wurden von einigen Herstellern Preisspannen abgegeben. Im Mittel liegt der Preis der Systeme bei etwa 300 €/kWp.

4 Konstruktionsentwurf

Basierend auf den Erkenntnissen aus den Grundlagen, der Markanalyse sowie den formulierten Systemanforderungen wurde ein erster Konstruktionsentwurf erarbeitet. Der Entwurf diente als Diskussionsgrundlage mit SIG-Solar und wurde anschließend in einer zweiten, detaillierten Entwurfsvariante optimiert.

4.1 Systemanforderungen

Basierend auf den Erfahrungen von SIG-Solar bei der Installation von PV-Anlagen auf Flachdächern wurden folgende Systemanforderungen definiert:

- [a] Geringe Systemkosten
- [b] Gewichtsminimierung
- [c] Montagefreundlichkeit, kurze Montagezeiten
- [d] Gewährleistung der Standsicherheit der einzelnen Systemkomponenten
- [e] Einsatzbereich: gesamt Deutschland
- [f] Verstellbarer Neigungswinkel
- [g] Keine Dachdurchdringung bei Foliendächern
- [h] Möglichkeit der Schraubanbindung bei Profildächern
- [i] Integration eines Modulwechselrichtern
- [j] Belüftung der Module gewährleisten
- [k] Sicherstellung des Wasserablaufs
- [l] Geringes Transportvolumen
- [m] Unterschiedliche Modulabmessungen

Die Systemanforderungen werden nachfolgend im Text durch die Nummerierung hervorgehoben. Dadurch wird der Bezug zu den Systemanforderungen erleichtert. Die Auflistung erfolgt nach der Gewichtung der Anforderungen.

4.2 Entscheidungsgrundlagen

4.2.1 Wahl des Werkstoffes/Fertigungsverfahrens

Die Wahl des Werkstoffes und das Fertigungsverfahren haben wesentlichen Einfluss auf die Kosten des Systems [a]. Die Geometrie der einzelnen Querschnitte

und somit die Menge des Rohstoffes hängt in erster Linie von den Werkstoffeigenschaften ab. Die Wirtschaftlichkeit eines Werkstoffes hängt wiederum von seinem Rohstoffpreis und der Lebensdauer ab. Im Bereich PV muss der Werkstoff darüber hinaus auch folgende Anforderungen erfüllen:

- ◆ Geringes Gewicht [b]
- ◆ Korrosionsbeständigkeit [d], [e]
- ◆ Individuelle Gestaltungsmöglichkeit bei niedrigen Kosten [a]
- ◆ Einfache Verarbeitbarkeit bei der Montage [c]
- ◆ Entsorgung

Werkstoff

Im Einsatzgebiet PV hat Aluminium mit Abstand den größten Marktanteil im Bereich Unterkonstruktion. Aufgrund der langjährigen positiven Erfahrungen mit dem Werkstoff, des geringen Gewichtes [b], der Korrosionsbeständigkeit und der einfachen Verarbeitbarkeit bei der Montage [c] wird der Werkstoff Aluminium für das Montagesystem ausgewählt.

Aluminium ist vollständig wiederverwertbar. Die Eigenschaften des Werkstoffs werden durch die Nutzung in einem Produkt nicht beeinträchtigt, so dass Aluminium beliebig oft ohne Qualitätsverluste wieder verwertet werden kann.

Die mechanischen Eigenschaften und der Aspekt der Wirtschaftlichkeit [a] ist bei Aluminium in erster Linie davon abhängig, welche Aluminiumlegierung gewählt werden. Auf der Grundlage langjähriger Erfahrungen von mehreren Fachunternehmen wird für Bleche die Legierungen EN AW 5754 H22 und für Profile EN AW-6060 T66 gewählt (Mechanische Kennwerte vgl. Tabelle 5.3). In Verbindung mit dem Fertigungsverfahren liefern diese Legierungen die wirtschaftlichste Lösung für diesen Anwendungsfall.

Als Verbindungsmittel werden nur Bauteile aus rostfreiem Edelstahl verwendet. Diese sind korrosionsbeständig, wodurch die Standsicherheit [d] einer PV-Anlage über die gesamte Lebensdauer garantiert wird.

Fertigungsverfahren

Für die Fertigung der Profile wird als Verfahren das Strangpressen [17] gewählt. Das Strangpressverfahren stellt das wirtschaftlichste [a] Formgebungsverfahren für Aluminium dar. Dieses Verfahren ermöglicht es besonders leichte [b], individuell optimierte Querschnitte zu fertigen. Die relativ niedrigen Werkzeugkosten [a]

und die hohe Produktionsleistung erlauben es auch kurze Formteile, durch abtrennen vom gepressten Strang mittels Stanzen oder Sägen wirtschaftlich [a] herstellen zu lassen.

Bleche werden im Walzprozess [17] gefertigt. Bei den meisten Aluminiumlieferanten werden Bleche in verschiedenen Stärken als Lagerware vorgehalten. Diese haben Standardabmessungen. Um Kosten für Abschnitte zu minimieren [a] müssen diese Abmessungen berücksichtigt werden.

4.2.2 Modulneigungswinkel

In Abhängigkeit von den Dachabmessungen, der Dachausrichtung sowie der Dachneigung kann es sinnvoll sein vom optimalen Neigungswinkel (vgl. Kap. 2.3) abzuweichen um eine höhere Flächenausnutzung zu erreichen (vgl. Gl. 2.1). Es wird untersucht welche Stellmöglichkeiten [f] eine wirtschaftlich optimierte Lösung [a] ergeben.

Ein variabler Neigungswinkel kann entweder stufenlos oder durch mehrere Stellmöglichkeiten eines Stützdreiecks realisiert werden. Stufenlose Lösungen bieten die Möglichkeit, die Module bei unterschiedlichen Dachneigungen optimal zur Sonne auszurichten, wodurch höhere Erträge erwirtschaftet werden können. Allerdings ist diese Lösung gegenüber einer mit definierten Stellmöglichkeiten mit einem konstruktiven Mehraufwand und damit höheren Kosten verbunden.

Mit Hilfe des Simulationsprogramms PV*Sol expert werden die Erträge bei verschiedenen Modulneigungswinkeln (MNW) ermittelt. Um eine möglichst genaue Annäherung an ein stufenloses System zu erlangen wird der MNW in Schritten von einem Grad eingestellt. Folgende Randbedingungen werden für die Simulation festgelegt:

◆ Anlagengröße [kWp]:	5,4
◆ Modultyp:	Sun-Earth 180 Wp
◆ Modulanzahl:	30
◆ Wechselrichter:	Diehl AKO Platinum 5300 TL
◆ Anlagenausrichtung [°]:	180 (Süden)
◆ Breitengrad, Ort [°]:	53 (Bremen)
◆ Abschattungswinkel γ [°]:	13.5

Die Reihenabstände d_M ergeben sich nach Gl. [2.2]. Bild 4.1 zeigt den Versuchsaufbau. Die einzelnen Gebäude simulieren die aufgeständerten Strings.

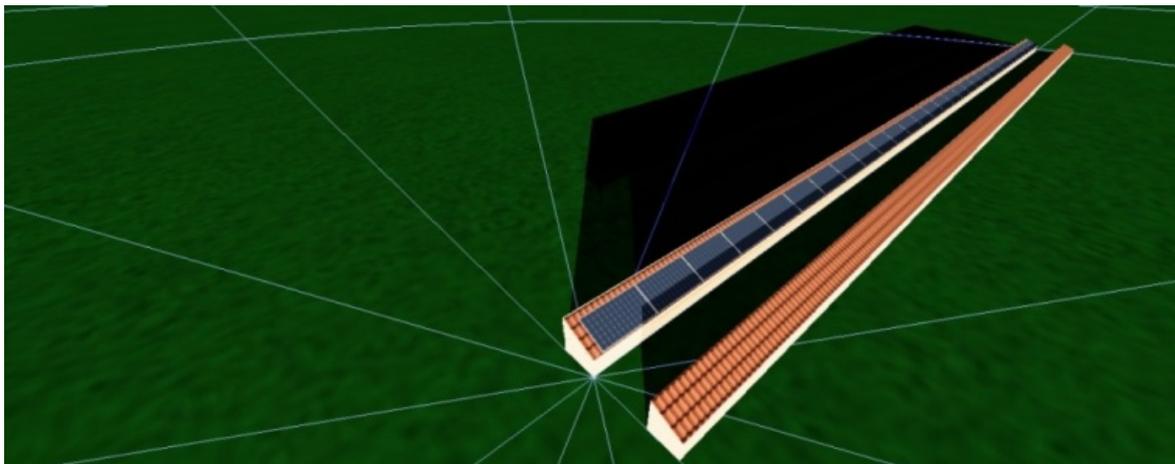


Bild 4.1: Aufbau der Simulation zur Ertragsermittlung mit PV*SOL expert

Die Ergebnisse der Simulation sind in Bild 4.2 dargestellt. Der Ertrag steigt mit der Erhöhung des Modulneigungswinkels nicht linear. Im Bereich zwischen 0° und 15° beträgt die mittlere Ertragszunahme pro Grad $0,8\%$. Bei zunehmendem Modulneigungswinkel wird die Steigung der Kurve geringer, die Ertragszunahme pro Grad beträgt im Bereich zwischen 15° und 35° nur noch $0,3\%$.

Der resultierende Ertragsverlust würde beispielweise bei einer 30 kW Anlage und einer Einspeisevergütung von $0,3405\text{ €/kWh}$ etwa 28 €/° im Jahr betragen.

Ab einem MNW von 15° ist eine stufenlose Einstellbarkeit deshalb nicht sinnvoll, da der konstruktive Mehraufwand in keinem Verhältnis zu dem möglichen Mehrertrag steht. Darüber hinaus ist der Montageaufwand bei einem Stützdreieck mit mehreren definierten Stellmöglichkeiten geringer als bei der stufenlosen Lösung. In Abhängigkeit vom Modulneigungswinkel wird eine Stellvariante direkt gewählt und mittels einer formschlüssigen Verbindung justiert. Diese Verbindungsart ist statisch günstig, da die Kräfte direkt in den Querschnitt eingeleitet werden. Für den Entwurf wird ein Stützdreieck mit mehreren definierten Stellmöglichkeiten gewählt.

In Absprache mit SIG-Solar und unter Berücksichtigung der am häufigsten vorkommenden Dachneigungen im Bereich Flachdach (vgl. Kap. 3.1.3) werden die MNW 15° , 20° , 25° und 30° für das Montagesystem definiert (vgl. Bild 4.2.). Dadurch werden die wesentlichen Stellmöglichkeiten abgedeckt.

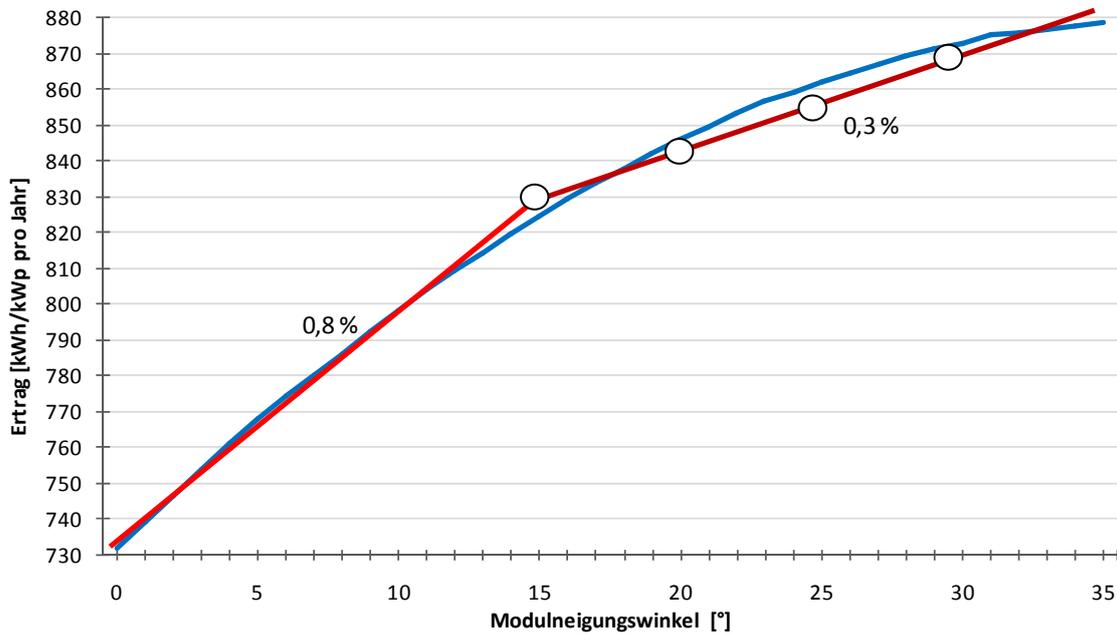


Bild 4.2: Ertrag in Abhängigkeit vom Modulneigungswinkel

4.2.3 Modulabmessungen

Modulabmessungen sind nicht genormt, dadurch variieren ihre Abmessungen. Gerahmte, kristalline Module unterscheiden sich in der Rahmenhöhe, -breite und -tiefe.

Die Module, die SIG-Solar vertreibt, werden von Ningbo Solar Electric Power produziert und haben die in der Tabelle 4.1 dargestellten Abmessungen. Da das Aufständerungssystem langfristig auch für die Abmessungen anderer Modulhersteller kompatibel sein soll [m], muss geklärt werden, welche Abmessungen diese Module haben. Die in der Tabelle 4.1 angegebenen Zahlen basieren auf einer Marktübersicht für Module der Zeitschrift PHOTON-Profi [20]. Es wurden ca. 1000 gerahmte, kristalline Module aufgeführt. Die Auswertung der Übersicht ergab einen empirischen Bereich der Modulabmessungen.

Tabelle 4.1: Abmessungen der Ningbo Module und anderer Modulhersteller

Modulabmessungen des Herstellers Ningbo Solar Electric Power			
Modul	Höhe [mm]	Breite [mm]	Tiefe [mm]
Sun-Earth 180 Watt	1580	808	46
Sun-Earth 220 Watt	1642	992	46
Sun-Earth 230 Watt	1642	992	46
Sun-Earth 240 Watt	1596	1065	46
Sun-Earth 270 Watt	1958	992	46
Modulabmessungen basierend auf der Marktübersicht der PHOTON-Profi			
	Höhe [mm]	Breite [mm]	Tiefe [mm]
min	400	284	34
max	2000	1238	50
empirischer Bereich	1500 ± 100	800 ± 100	45 ± 5

4.2.4 Modul-Wechselrichter von Enecsys

SIG-Solar plant eine enge Zusammenarbeit mit dem Hersteller von Modul-Wechselrichtern Enecsys. Das englische Unternehmen ist weltweit führend in der Entwicklung, Produktion und Vermarktung von netzgebundenen Modulwechselrichtern. Bei der Systemanforderung [i] „Integration eines Modulwechselrichters“ geht es darum eine möglichst montagefreundliche [c], gewichtsarme [b] sowie kostengünstige [a] Lösung zu erarbeiten.

Der wesentliche Unterschied zu String-Wechselrichtern liegt in der Umwandlung von Gleichstrom in Wechselstrom eines Moduls, was eine Installation des Gerätes in unmittelbarer Nähe zum Modul erlaubt. Witterungsbeständigkeit und ein gleichbleibender Wirkungsgrad im Temperaturbereich von -40 °C bis 85 °C lassen es zu, den Inverter innerhalb sowie außerhalb der Unterkonstruktion zu befestigen. Die Abmessungen L/B/H 240/160/35 mm (siehe Bild 4.3) und das Gewicht von 1,67 kg machen den Inverter sehr handlich, wodurch er problemlos in jeder Position befestigt werden kann. Die Kabel verlaufen auf der Rückseite des Moduls und werden über Steckverbindungen seitlich an den Inverter angeschlossen. Im Schadensfall muss der Inverter ausgetauscht werden, dafür ist ein möglichst schneller Zugang zum Gerät erforderlich.

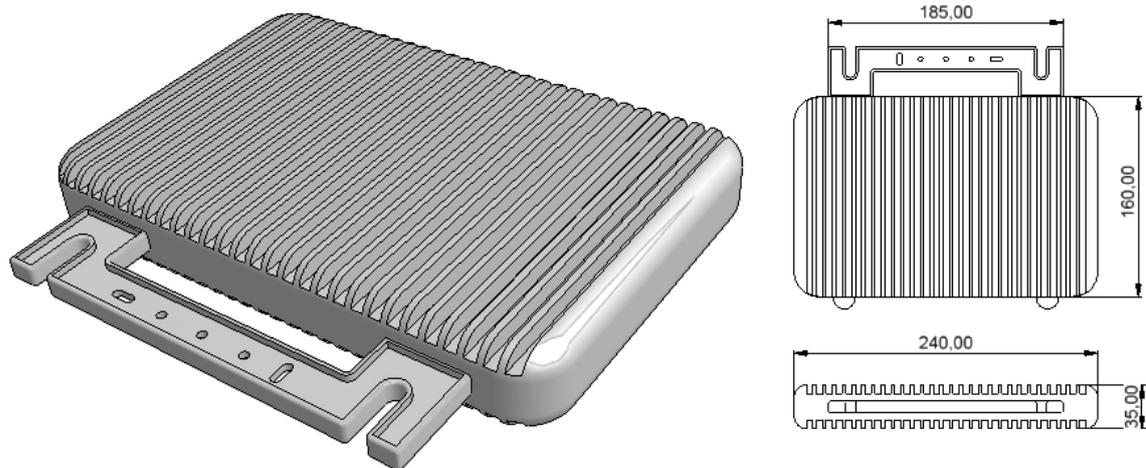


Bild 4.3: Modulwechselrichter der Firma „enecsys micro-inverters“

4.2.5 Temperatureinfluss auf Module

Die Ausgangsleistung von PV-Modulen ist temperaturabhängig und verringert sich mit steigender Zell- bzw. Modultemperatur.

Bei einer geschlossenen Bauweise (Rückseite der Ständerdreiecke verschlossen) kommt es zu einem Hitzestau unterhalb des Moduls. Abhängig vom Standort kommen auf Flachdächern in den Sommermonaten Temperaturen bis zu 80 °C vor [4]. Eine Untersuchung des TEC-Instituts hat ergeben, dass eine Hinterlüftung der Module bei der Wannensmontage (geschlossene Bauweise) über das Jahr gesehen einen Ertragsvorteil von 1-2 % erwirtschaftet [21].

Der Hitzestau kann durch einfache konstruktive Maßnahmen verhindert werden. Luftschlitze unterhalb und oberhalb des Moduls begünstigen die freie Konvektion.

4.2.6 Gewährleistung des Wasserablaufs

Aufgrund von nicht eindeutigen Empfehlungen der Fachregeln kommt es, oft bei Schäden durch stehendes Wasser auf Flachdächern, zum Rechtsstreit [22].

"Auf Dachflächen mit einer Dachneigung bis ca. 5 % ist, ... mit behindertem Wasserablauf und Pfützenbildung zu rechnen" Flachdachrichtlinie [4].

"Können sich selbst geringfügige, aber länger einwirkende Mengen stehenden Wassers (z.B. Pfützen) schädigend auf Schutz- und Belagsschichten auswirken, ... so ist durch eine planmäßige Gefällebildung oder andere Maßnahmen für eine vollständige Wasserableitung zu sorgen" DIN 18531 [II].

Da nicht eindeutig geklärt ist, wann stehendes Wasser auf Flachdächern sich schädigend auf die Dachdichtung auswirkt, sollte der Wasserablauf nach der Montage einer PV-Anlage sicher gestellt sein [k]. Dadurch wird das Risiko einer nachträglichen Schadensklage vermieden.

4.3 Systembeschreibung

Im ersten Entwurfsschritt sind die Bauteile grob vordimensioniert worden. Hierzu wurde das Statikprogramm R-Stab 7 sowie DUENQ von Dlubal verwendet. Die Darstellung des Entwurfs ist im Anschluß an die Beschreibung zu finden.

Im Vergleich zu herkömmlichen Aufständersystemen beinhaltet der Entwurf keine Trägerprofile in Modullängsrichtung [a], [b], [c]. Dadurch müssen die Module an der kurzen Seite gestützt werden. Die Auflagerung wird durch Stützdreiecke realisiert, an denen die Befestigung durch Modulklemmen erfolgt. Die durch SIG-Solar vertriebenen Sun-Earth-Module verfügen in Längsrichtung über ein Hohlkammerprofil. Durch das die Module einen vergleichsweise steifen Rahmen haben, so dass der Modulhersteller die Befestigung der Module auf der kurzen Seite zulässt.

Die Belüftung der Module [j] wird durch zwei Lüftungsschlitze oberhalb und unterhalb des Moduls realisiert. Seitlich sind keine Bleche vorgesehen [a], [b], [c], was sich ebenfalls positiv auf die Belüftung der Module [j] auswirkt. Die Notwendigkeit von Seitenblechen kann nur unter Realbedingungen ermittelt werden. Seitenbleche rein aus ästhetischen Gründen vorzusehen wirkt gegen die Systemanforderung der geringen Kosten [a].

Durch die Kopplung der einzelnen Modulreihen können abhebende Kräfte aufgenommen werden [g]. Die Module müssen gekoppelt parallel in beide Richtungen angeordnet werden (vgl. Bild 4.6)

Bild 4.4 zeigt die Realisierung der Systemanforderung [f] bei verstellbarem Neigungswinkel. Die Stellschraube (vgl. Bild 4.6) am unteren Ende des SP ist das einzige Bauteil des Stützdreiecks das vor Ort montiert werden muss. Die restlichen Bauteile können unter Werkstattbedingungen vormontiert werden [a].

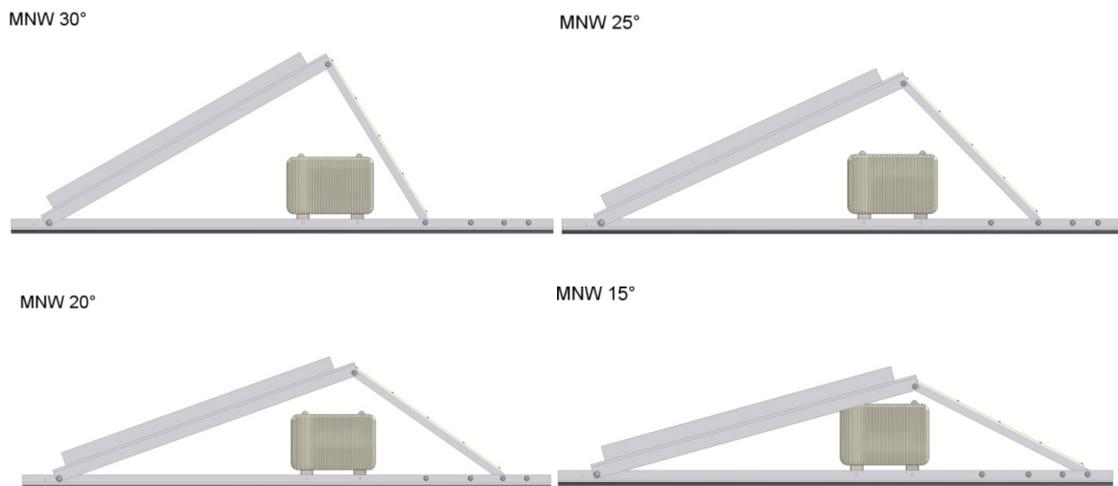


Bild 4.4: Stellmöglichkeiten des MNW

In dem Konzept wurde ebenfalls die Distribution des Produktes berücksichtigt. Transport- und Verpackungskosten sind abhängig von Gewicht und Volumen. Große Abmessungen des Transportguts bewirken im Vergleich zu kompakten Transporteinheiten höhere Kosten. Um diese Kosten zu minimieren [1] ist durch die Formgebung der einzelnen Profile ein „Ineinanderklappen“ ermöglicht worden (vgl. Bild 4.5.).



Bild 4.5: Ineinanderklappen der Winkelstütze

4.3.1 Bauteile

Winkelstütze

Die Module werden durch Winkelstützen aus der Horizontalen geneigt. Die Winkelstütze bestehen aus Fuß- (FP), Stütz- (SP) und Modulträgerprofil (MTP) und werden jeweils zwischen zwei Modulen aufgestellt, wodurch für die mittleren Module nur eine Winkelstütze benötigt wird [a]. Die einzelnen Profile sind gelenkig miteinander verbunden. Durch definierte Profillängen können die Winkelstützen unter Werkstattbedingungen vorkonfektioniert werden. Automatisierte Arbeitsschritte ermöglichen eine Steigerung der Qualität sowie eine Senkung der Montagekosten.

Fußprofil

Das FP dient einerseits als Verbindungsglied zwischen SP und MTP andererseits leitet das FP die Lasten über die bauphysikalischen Schichten in die Dachkonstruktion ein.

Um die Flächenpressung auf „weiche“ Dämmstoffe wie Mineralwolle (vgl. Tab. 2.3) zu minimieren, verfügt das FP über eine breite Auflagefläche. An die Stege sind das MTP und das SP einachsiger gelenkig angeschlossen. Wobei für das Gelenk des SP's mehrere Stellmöglichkeiten durch vorkonfektionierte Bohrungen vorgesehen sind [f]. Auf der Unterseite des Profils ist eine Antirutschmatte vorgesehen. Sie erhöht den Reibwiderstand und schützt die Dachdichtung vor Beschädigungen durch scharfe Kanten. Die Antirutschmatte besteht aus einem wasserdurchlässigen Material, wodurch das Anstauen von Regenwasser verhindert wird [k]. Am inneren Steg des FP ist der Modulwechselrichter angebracht [j]. Die Befestigung erfolgt an zwei vorkonfektionierten Bohrungen in definierten Abständen. Zur Lage-sicherung werden Schrauben mit metrischem Gewinde verwendet [a].

Stützprofil

Das SP verbindet das MTP und das FP. An dem Stützprofil werden die Windleitbleche durch selbstbohrende Schrauben befestigt.

Modulträgerprofil

An der Rückseite des MTP's ist eine Erhöhung in der Breite der Modulmittelklemme vorgesehen. Die Erhöhung dient als Anschlagkante für die Ausrichtung der Module in Längsrichtung [c] sowie als Verdickung des Materials, um Gewindebohrungen für die Modulklemmen einbringen zu können. Die Länge des Profils lässt Modulbreiten im ermittelten Bereich von 800 ± 100 mm zu (vgl. Tab. 5.1)

Koppelprofil

Die Koppelprofile (KP) werden in die Fußprofile eingeschoben und mit selbstschneidenden Schrauben fixiert. Die Längen der KP variiert in Abhängigkeit vom Modulreihenabstand. Abhängig vom Standort der Anlage und dem MNW ergeben sich unterschiedliche Längen der KP. Unterhalb des KP entsteht ein Spalt in der Stärke der Antirutschmatte, durch den der Wasserablauf gewährleistet ist [k].

Windleitblech

Ein weiteres Grundbauteil ist das Windleitblech. Durch die rückseitige Anordnung wird der Sogeffekt verhindert. Die geschlossene Form verhindert starke hebende Kräfte an den Auflagern, wodurch das Risiko des Kippens und Abhebens minimiert wird. Das Blech wird an den SP mit selbstschneidenden Schrauben vor Ort angebracht. Im Fall eines beschädigten Modulwechselrichters oder Moduls können die Schrauben gelöst werden, wodurch der Zugang zu den Bauteilen ermöglicht wird.

4.3.2 Gesamtdarstellung

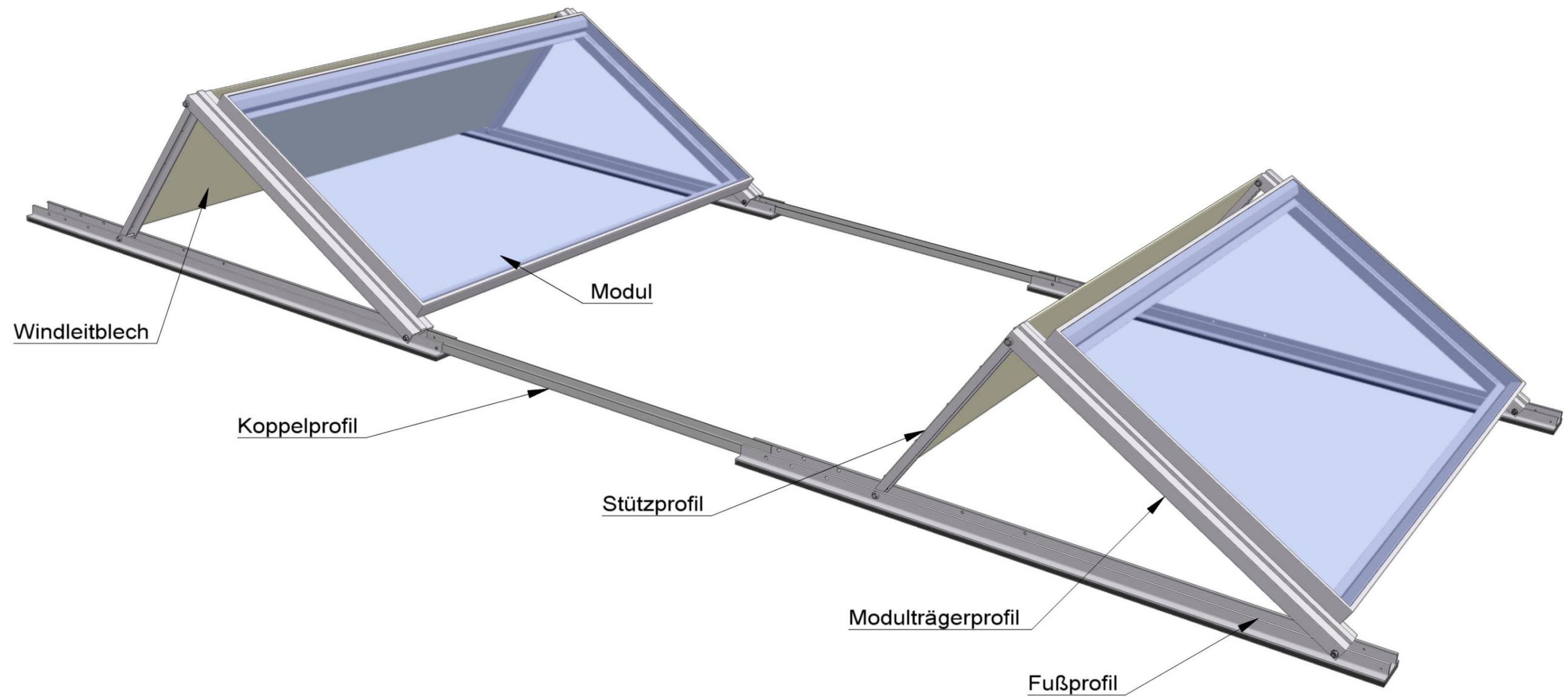


Bild 4.6: Gesamtdarstellung des ersten Entwurfsvorschlags

4.4 Optimierung des Entwurfs

Um Kosten [a] und Gewicht [b] des Systems weiter zu minimieren, sind wesentliche Änderungen vorgenommen worden. Die Optimierung ist mit Einschränkungen der Systemanforderung [m] verbunden. Dieses Kapitel beinhaltet eine detaillierte Ausarbeitung des Entwurfs, in die auch Erkenntnisse aus der statischen Bemessung eingeflossen sind.

In Absprache mit SIG-Solar wurde die Entscheidung getroffen, das Aufständersystem auf das 180 Watt SUN-Earth Modul (vgl. Tab. 5.1) abzustimmen. Dieses Modul ist derzeit mit ca. 80 % am Gesamtumsatz beteiligt. Nach Aussage von SIG-Solar wird sich das in naher Zukunft auch nicht wesentlich ändern. Damit entfällt die Anforderung, mit dem System Module unterschiedlicher Abmessungen verwenden zu können [m].

Durch den steifen Modulrahmen kann das Modul als ein tragendes Element des Systems verwendet werden. Dadurch kann das MTP entfallen (Gewicht: ca. 740 g). Anstelle des MTP sind zwei Modulaufleger (MA) entworfen worden (Gewicht: 239 g), wodurch sich eine Werkstoffersparnis von 501 g pro Winkelstütze ergibt. Eine genaue Aufstellung des Gewichts der einzelnen Bauteile ist im Anhang B zu finden. In Bild 4.7 sind die beiden Winkelstützen gegenübergestellt.



Bild 4.7: Gegenüberstellung der Winkelstützen

Um zu gewährleisten, dass Lasten an die Tragkonstruktion des Daches weiter geleitet werden können, ohne dabei die bauphysikalischen Schichten (vgl. Kap. 3.1.7) langfristig zu beschädigen, wurde die Form des Querschnitts für das FP geändert. Das FP wird als U-Profil ausgeführt. Die Verbreiterung des Flansches unterhalb der lasteinleitenden Punkte (Anschlußbereich MA unten und SP) erfolgte durch zusätzliche Auflagerplatten (AP). Die AP werden in der Vorkonfektion bei Bedarf an das FP mechanisch befestigt. Darüber hinaus wurde das FP um hundertachtzig Grad gedreht. Der MNW wird im Gegensatz zur ersten Entwurfsvariante am unteren MA verstellt. Die Änderung des MNW bei der Installation kann so komfortabler realisiert werden [c]. Im Flanschbereich wurden Langlöcher angeordnet. Dadurch wird der Einsatz des Stützdreieckes auf Dächern mit Dacheindeckungen aus Profilbleche ermöglicht [h].

Die Anordnung der Befestigungspunkte in den Eckbereichen des Moduls bedeutet eine Abweichung von den üblichen Befestigungsvarianten. Um die Modulbelastung zu minimieren werden Module in den Drittels-Punkten der langen bzw. kurzen Seite befestigt. Um zu gewährleisten, dass die geplante Ausführung nicht zu einer Beschädigung der Module führt, ist eine mechanische Lastprüfung gemäß der gängigen Norm zur Bauartzulassung von terrestrischen PV-Modulen (IEC 61215) am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme durchgeführt worden.

Die mechanische Lastprüfung simuliert in der Praxis auftretende, statische Belastungen des Moduls durch Wind, Schnee und Eis. Bei der Prüfung wurde ein Modul gemäß einer Montageanleitung, die der Befestigungssituation des Entwurfes entspricht belastet. Das Modul hat den Test bestanden. Der Abschlussbericht der Prüfung kann im Anhang F eingesehen werden.

Den Modulauflagern (vgl. Bild 4.8) kommt eine tragende [d] sowie eine konstruktive [c] Funktion zu. Sie geben die auftretenden Belastungen, die auf das Modul wirken in das SP und FP weiter. Somit sind die MA mit den Modulklemmen das Bindeglied zwischen Modul und Gestell. Die MA sind an die Geometrie des Modulrahmens angepasst. Das Modul kann auf das MA unten aufgelegt werden. Durch die Anordnung der Kippachse über der Drehachse neigt sich das Auflager mit dem Modul. Das obere MA wird in den Modulrahmen eingehakt. Beide MA verfügen über Einschnitte (vgl. Bild 4.8) in die das Seitenprofil des Moduls passt. Das Modul ist somit gegen seitliches Ausweichen gesichert. Um den Ausgleich von geringen Unebenheiten im Dach oder nachträgliche Setzungen zu ermöglichen, verfügt das MA unten über ein Langloch. Durch die mittig angeordnete Gewindebohrung werden die MK mit den MA verbunden.

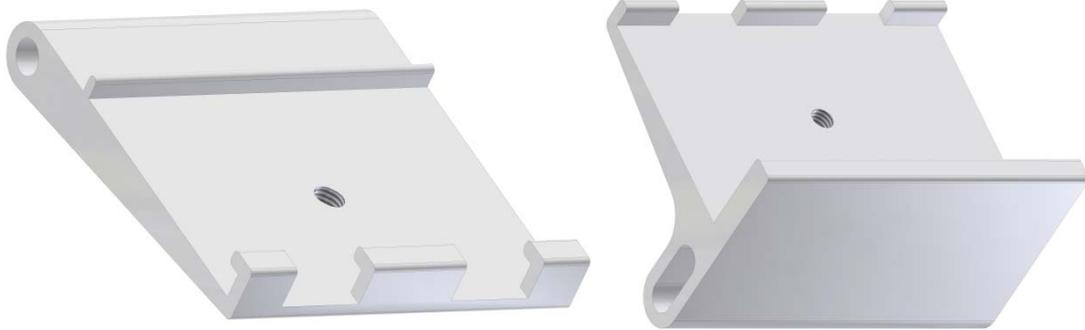


Bild 4.8: MA oben (links) und des MA unten (rechts)

Die Anbindung der Module an die Winkelstützen erfolgt über Modulklemmen. Unterschieden wird zwischen Modulend- und Modulmittelklemmen. Die Form der Modulklemmen orientiert sich an bereits am Markt vorhandenen Produkten (vgl. Kap. 2.2.3). Diese wurden geringfügig an die Modulauflager angepasst.

Um eine möglichst schnelle Installation vor Ort zu ermöglichen ist auch bei dem optimierten Konstruktionsentwurf die Möglichkeit der Vorkonfektionierung berücksichtigt worden.

Dadurch beschränkt sich die Installation auf folgende Arbeitsschritte:

- ◆ Positionierung der WS auf dem Dach
- ◆ Einlegen der Module in die MA
- ◆ Verkabelung der Module
- ◆ Ggf. Befestigung und Verkabelung des Modulwechselrichters
- ◆ Befestigung des Windleitblechs an den SP
- ◆ Einlegen und Befestigen der KP an den FP

4.4.1 Gesamtdarstellung

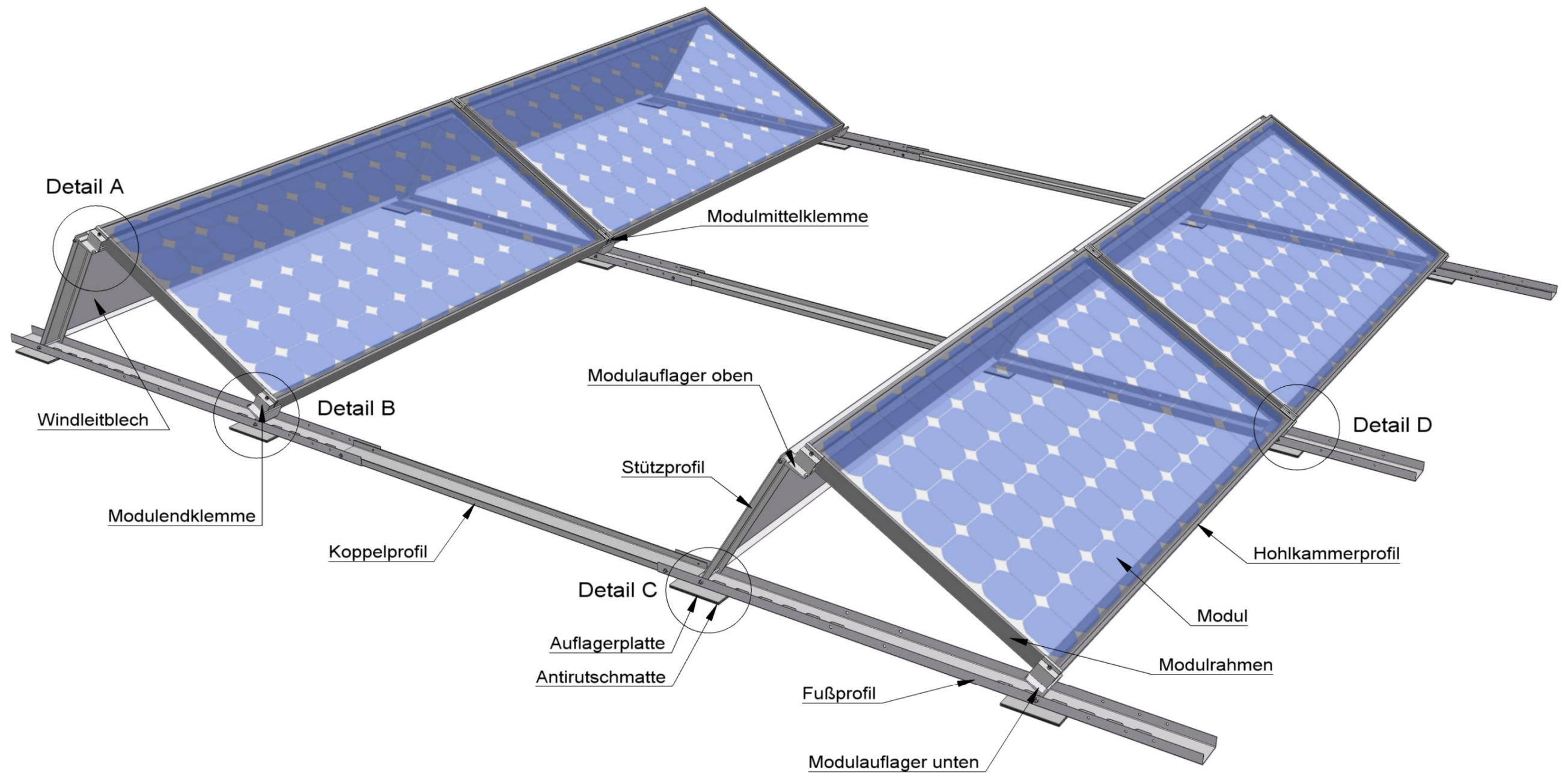
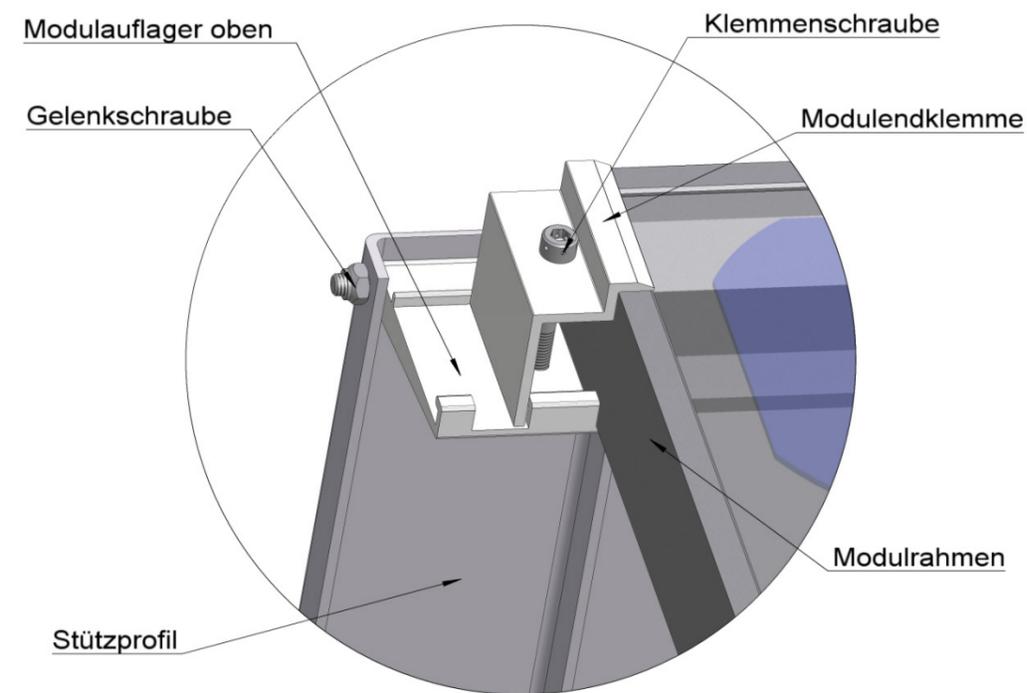


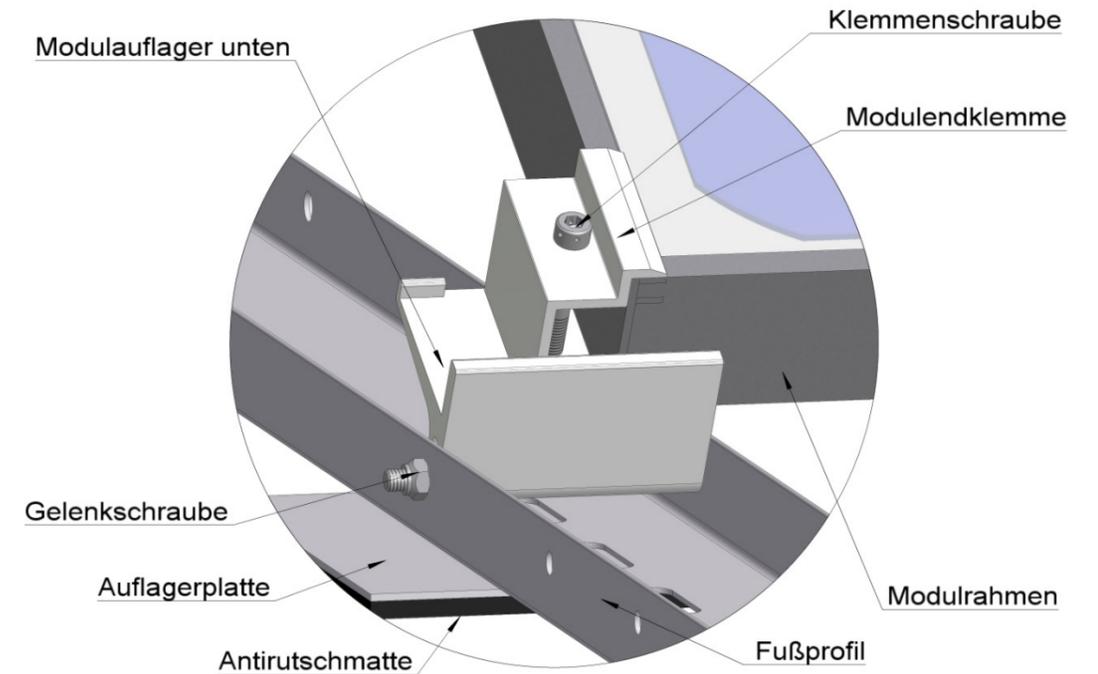
Bild 4.9: Gesamtdarstellung des optimierten Entwurfs MNW = 30°

4.4.2 Detaildarstellung

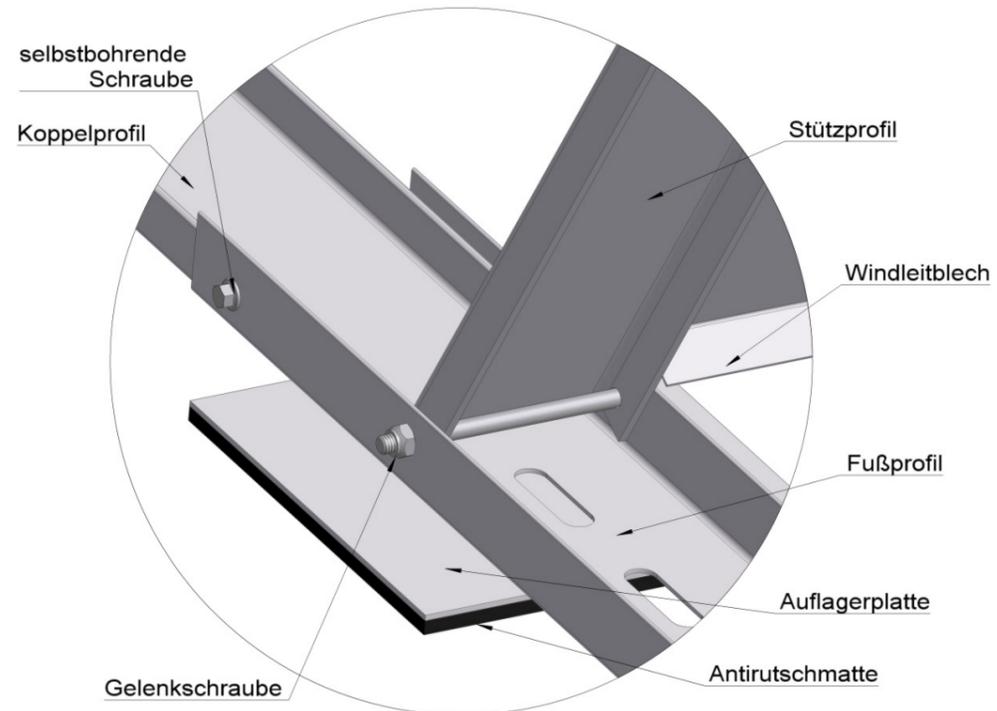
Detail A



Detail B



Detail C



Detail D

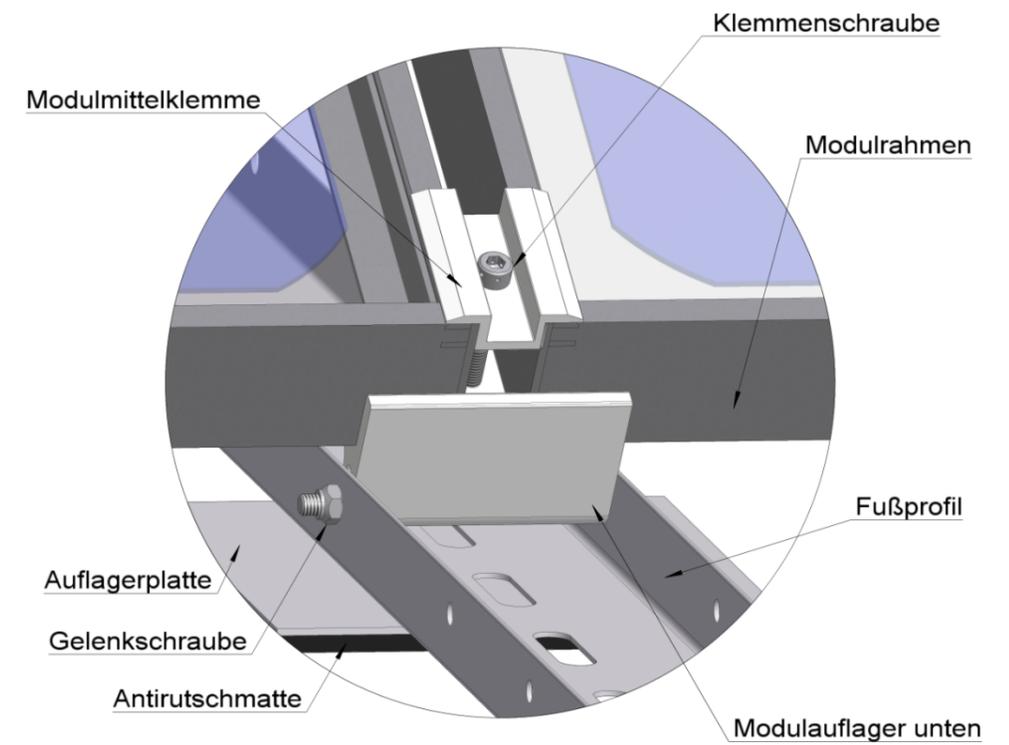


Bild 4.10: Detaildarstellung des optimierten Entwurfes

5 Statische Bemessung

5.1 Aufgabenstellung

Als sonstige Bauprodukte müssen Unterkonstruktionen von PV-Modulen auf Dächern alle standsicherheitsrelevanten Nachweise erfüllen. Gegenstand der statischen Bemessung sind die Nachweise der Standsicherheit der einzelnen Bauteile (Profile, Bleche, Verbindungsmittel) des Aufständersystems für das Unternehmen SIG-Solar. Diese Bemessung beinhaltet nicht die Nachweise der Standsicherheit der gesamten Anlage (Kippen, Gleiten Abheben). Aufgrund fehlender Normung in Bereich PV kann der „aerodynamische Effekt“ nicht hinreichend genau beschrieben werden. Die Belastungen nach DIN führen in den meisten Fällen zu ungünstigen Auflagerreaktionen, wodurch eine zu hohe zusätzliche Last (Beschwerung) notwendig ist. Es wird davon ausgegangen dass der „aerodynamische Effekt“ durch Tests unter Realbedingungen genauer erfasst werden kann. Aufgrund des begrenzten Zeitraums für die Diplomarbeit wird die Systemstatik auf der Grundlage der DIN durchgeführt. Dies führt gegebenenfalls zu einer geringfügigen Überdimensionierung der Bauteile.

5.2 Vorbemerkungen

Aufgeständerte PV-Module auf Flachdächern werden im Wesentlichen durch Wind-, und Schneelasten beansprucht.

In Deutschland ist die DIN 1055-4 [VI] gültig und auf europäischer Ebene der Eurocode EN 1991-1-4 [VIII]. Der Ansatz der Schneelasten erfolgt nach der DIN 1055-5 [VII]. Auf den Ansatz einer Eislast wird verzichtet. Da die aufgeständerten Module eine Höhe von 50 cm nicht überschreiten, wird nach DIN 1055-5 (4.2.8) [VII] auf den Ansatz von Lasten infolge Schneehäufungen durch Windverwehungen verzichtet.

Die Beanspruchung des Systems ist laut DIN vom Aufstellort abhängig. Um zu gewährleisten, dass das System für den allgemeinen Standort nicht überdimensioniert ist, werden Einschränkungen für Wind- und Schneelastzone vorgenommen. Sollte das Aufständersystem in exponierter Lage eingesetzt werden, ist die Tragfähigkeit zu prüfen.

Laut dem Bauordnungsrecht gelten gebäudegebundene PV-Anlagen als Teil des Bauwerks und unterliegen somit den technischen Regeln des Bauwesens. Die Bemessung basiert auf folgenden technischen Regeln:

Tabelle 5.1: Übersicht der Berechnungsgrundlagen

Norm	Ausg.	Titel
DIN 1055-100	03.01	Grundlagen der Tragwerksplanung – Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln
DIN 1055-4	03.05	Einwirkungen auf Tragwerke – Schnee und Eislasten
DIN 1055-5	03.05	Einwirkungen auf Tragwerke – Windlasten
DIN EN 1991-4	07.05	Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Windlasten
DIN 18800-1	11.90	Stahlbauten, Bemessung und Konstruktion
DIN EN 1999-1-1	05.07	Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken

5.3 Konstruktionsbeschreibung

Bei der Konstruktion handelt es sich um ein Aufständersystem für PV-Module auf flachen Dächern. Mittels sogenannter Winkelstützen werden die Module aus der Horizontalen geneigt. Die Winkelstützen bestehen aus einem Fußprofil, einem Stützprofil sowie zwei Modulauflägern. Die Modulaufläger und die Profile sind einachsrig, gelenkig miteinander verbunden. Der Neigungswinkel der Module ist in den Winkeln $\alpha_1 = 15, 20, 25, 30^\circ$ einstellbar. Die Module werden in Reihen aufgestellt. Die einzelnen Reihen werden durch Koppelprofile miteinander verbunden. Um den Windangriff zu minimieren werden die Dreiecke rückseitig durch Windbleche verschlossen. Das System kommt bei Dächern mit Dachdichtung ohne Befestigung an die Tragstruktur des Daches aus. Dach und Aufständersystem sind somit zwei voneinander getrennte Systeme.

Eine detailliertere Beschreibung der einzelnen Komponenten ist im Kap. 4 Entwurf zu finden.

5.4 Systemabmessungen

Tabelle 5.2: Systemabmessungen in Abhängigkeit vom MNW

MNW	b_M	b_{WLB}	l_{ws}
[°]	[mm]	[mm]	[mm]
15	808	467	1198
20			1136
25			1051
30			934

5.5 Werkstoffkennwerte

Tabelle 5.3: Werkstoffkennwerte

Profile: EN AW 6060 T66 (DIN EN 1999-1-1)		Bleche: EN AW 5754 H22 (DIN EN 1999-1-1)	
E	7000,0 kN/cm ²	E	7000,0 kN/cm ²
G	2700,0 kN/cm ²	G	2700,0 kN/cm ²
g_{Al}	27,0 kN/m ³	g_{Al}	27,0 kN/m ³
t_{max}	3,0 mm	t_{max}	100,0 mm
$f_{0,2k}$	16,0 kN/cm ²	$f_{0,2k}$	13,0 kN/cm ²
$f_{u,k}$	21,5 kN/cm ²	$f_{u,k}$	22,0 kN/cm ²
Schraube: Innensechskantschraube A2-70 (ähnlich DIN 912 (ISO4762))		Schraube: Selbstbohrende Schraube Sechskantkopf mit Bund (ähnlich DIN 7504-K; bauaufsichtliche Zulassung Z-14.1-4)	
$f_{u,k}$	70 kN/cm ²	$F_{VR,k}$	2,13 kN

5.6 Querschnittkennwerte

Die Kennwerte für die einzelnen Querschnitte wurden mit der Software DUENQ von der Firma Dlubal ermittelt. Die Werte wurden getrennt für den vollen und den geschwächten Querschnitt ermittelt. Die Kennwerte sind im Anhang C zu finden.

5.7 Positionsplan

Der Positionsplan kann zusammen mit den Konstruktionszeichnungen im Anhang A eingesehen werden.

5.8 Belastung

5.8.1 Lastfälle

Eigengewicht

Sun Earth PV-Modul 180 Wp;

Abmessungen: $l_M/b_M/h_M = 1,58/0,81/0,046$ m; Gewicht: $G = 16$ kg

$$g_{k,M} = \frac{G}{L} = 0,10 \text{ kN/m} \quad [5.1]$$

Das Gewicht der Unterkonstruktion wird vernachlässigt.

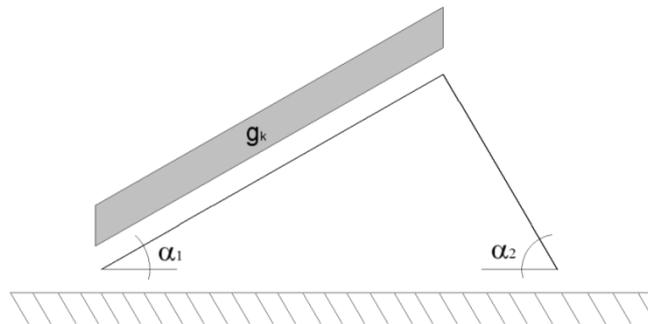


Bild 5.1: Lastfall Eigengewicht

Schnee

Schneelastzone II; max. Geländehöhe = 700 müNN

$$s_k = 0,25 + 1,91 * \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2 = 2,58 \text{ kN/m}^2 \quad [5.2]$$

$$s_{k,i} = \mu_i * s_k \quad [5.3]$$

Nach Gl. [6.3] ergeben sich für $s_{k,i}$ die in der Tabelle 5.4 aufgelisteten Werte für den Schneelastfall. Die Formbeiwerte basieren auf Tabelle 1 der DIN 1055-5 [VII].

Tabelle 5.4: Charakteristische Werte für Schneelasten.

α_1	α_2	$\mu_1(\alpha_1)$	$\mu_1(\alpha_2)$	$s_{k,1}$	$s_{k,2}$
[°]	[°]	[-]	[-]	[kN/m]	[kN/m]
15	22	0,80	0,80	1,31	1,31
20	29		0,80		1,31
25	37		0,61		1,00
30	46		0,37		0,61

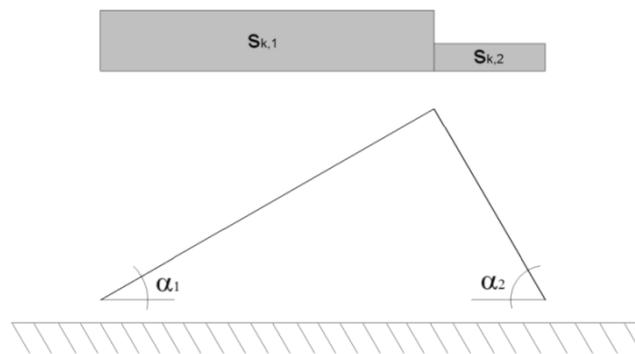


Bild 5.2: Lastfall Schnee nach DIN 1055-5 [VII]

Wind

Verknüpfungsvorschrift nach DIN 1055-4 Gleichung (4) [VII].

$$w_{e,k} = c_f * q_{(h_G)} * b \quad [5.4]$$

Staudruck $q_{(h_G)}$ nach DIN 1055-4 Tabelle 2; begrenzt für eine Gebäudehöhe $h_G \leq 25$ m und die Windlastzonen WZ 1 – 3. Aerodynamische Beiwerte nach DIN EN 1999-1-4 Tabelle 7.4a [VIII]. Zwischenwerte wurden interpoliert. Die Reibungskraft F_{fj} wird vernachlässigt. Die Resultierende Windkraft $F_{w,k}$ wird für den Fall Sog und Druck in Abhängigkeit vom MNW ermittelt.

Tabelle 5.5: Windlasten in Abhängigkeit vom Neigungswinkel

Modul											
b	e/10	α_1	$q_{(h_G)}$	$C_{pe,F}$	$C_{pe,H}$	$C_{pe,I}$	$C_{pe,J}$	$W_{F,k}$	$W_{H,k}$	$W_{I,k}$	$W_{J,k}$
[m]	[m]	[°]	[kN/m ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]
1,58	0,04	15	1,30	0,20	0,20	-0,40	-0,30	0,41	0,41	-0,82	-0,62
	0,06	20		0,40	0,30	-0,40	-0,30	0,82	0,62	-0,82	-0,62
	0,07	25		0,50	0,40	-0,40	-0,20	1,03	0,82	-0,82	-0,41
	0,08	30		0,70	0,40	-0,40	-0,20	1,44	0,82	-0,82	-0,41
Windleitblech											
b	e/10	α_1	$q_{(h_G)}$	$C_{pe,F}$	$C_{pe,H}$	$C_{pe,I}$	$C_{pe,J}$	$W_{F,k}$	$W_{H,k}$	$W_{I,k}$	$W_{J,k}$
[m]	[m]	[°]	[kN/m ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]
1,58	0,04	27	1,30	0,70	0,40	-0,40	-0,50	1,44	0,82	-0,82	-1,03
	0,06	36		0,70	0,50	-0,30	-0,40	1,44	1,03	-0,62	-0,82
	0,07	47		0,70	0,60	-0,20	-0,30	1,44	1,23	-0,41	-0,62
	0,08	60		0,70	0,70	-0,20	-0,30	1,44	1,44	-0,41	-0,62

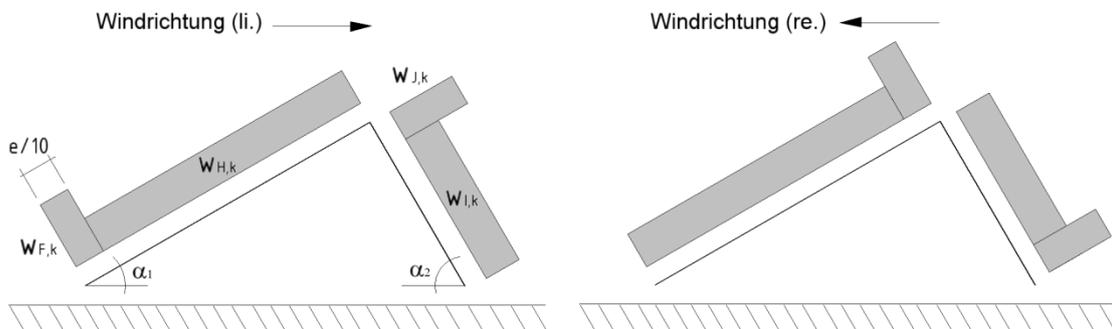


Bild 5.3: Lastfall Wind nach EN 1991-1-4

5.8.2 Lastfallkombinationen

Die Lastfallkombinationen sowie die Teilsicherheitsbeiwerte basieren auf dem Sicherheitskonzept der DIN 1055-100 [IX].

Teilsicherheitsbeiwerte

$$\gamma_G = 1,35; 0,9 \text{ (bei günstiger Lastwirkung)}$$

$$\gamma_Q = 1,50$$

$$\psi_{0,w} = 0,60$$

$$\gamma_{M1} = 1,10$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$LK_1 : \gamma_G * g_k + \gamma_Q * s_k + \psi_{0,w} * \gamma_Q * w_{k(li)} \quad [5.5]$$

$$LK_2 : \gamma_G * g_k + \gamma_Q * s_k + \psi_{0,w} * \gamma_Q * w_{k(re)} \quad [5.6]$$

$$LK_3 : \gamma_G * g_k + \gamma_Q * w_{k(li)} \quad [5.7]$$

$$LK_4 : \gamma_G * g_k + \gamma_Q * w_{k(re)} \quad [5.8]$$

$$LK_5 : \gamma_G * g_k + \gamma_Q * s_k \quad [5.9]$$

5.9 Schnittgrößen

Die Schnittgrößen wurden mit Hilfe der Software RSTAB 7.02 ermittelt. Eine Analyse der Schnittgrößen ergab in Abhängigkeit vom MNW und LK die maximalen Werte. Die Darstellung der Schnittgrößen, Verformungen kann im Anhang D eingesehen werden.

5.10 Auflagerreaktionen

Tabelle 5.6: Zusammenstellung der Auflagerreaktionen

MNW [°]	LK [-]	A_{Vd} [kN]	A_{Hd} [kN]	B_{Vd} [kN]
15	1	+1,96	+0,23	+1,66
	2	+1,62	-0,28	+1,91
	2	+0,52	+0,39	-0,21
	4	-0,31	-0,47	+0,20
	5	+1,84	-	+1,81
20	1	+1,97	+0,32	+1,72
	2	+1,58	-0,43	+1,83
	3	+0,41	+0,53	-0,03
	4	-0,24	-0,71	+0,22
	5	+1,75	-	+1,72
25	1	+1,87	+0,39	+1,55
	2	+1,55	-0,58	+1,57
	3	+0,52	+0,65	+0,12
	4	-0,02	-0,96	+0,28
	5	+1,59	-	+1,41
30	1	+1,65	+0,48	+1,32
	2	+1,43	-0,69	+1,19
	3	+0,46	+0,80	+0,39
	4	-0,09	-1,15	-0,03
	5	+1,40	-	+1,10

5.11 Berechnung und Nachweise

5.11.1 POS 01 – Fußprofil

Verhältnis Nettoquerschnitt zu Bruttoquerschnitt

$$\frac{A_{Netto}}{A} = \frac{1,98}{2,40} = 0,83 > 0,79 = \frac{16,5}{21,0} = \frac{f_{0,2}}{f_{u,k}} \quad \checkmark \quad [5.10]$$

Nachweis des Druckstabes im Stabbruttoquerschnitt

MNW = 15 °; LK 5 maßgebend; $N_d = 2,37 \text{ kN}$

$$N_{t,Rd} = \frac{A * f_{0,2,k}}{\gamma_{M1}} = \frac{2,40 * 16,0}{1,1} = 34,90 \text{ kN} \quad [5.11]$$

$$N_d = 2,37 \text{ kN} < 34,90 \text{ kN} = N_{t,Rd} \quad \checkmark \quad [5.12]$$

Nachweis des Druckstabes im geschwächten Querschnitt

MNW = 15 °; LK 5 maßgebend; $N_d = 2,37 \text{ kN}$

$$N_{t,Rd} = \frac{A_{nett} * f_{u,k}}{\gamma_{M2}} = \frac{1,98 * 21,0}{1,25} = 37,80 \text{ kN} \quad [5.13]$$

$$N_{Ed} = 2,37 \text{ kN} < 37,80 \text{ kN} = N_{tnett,Rd} \quad \checkmark \quad [5.14]$$

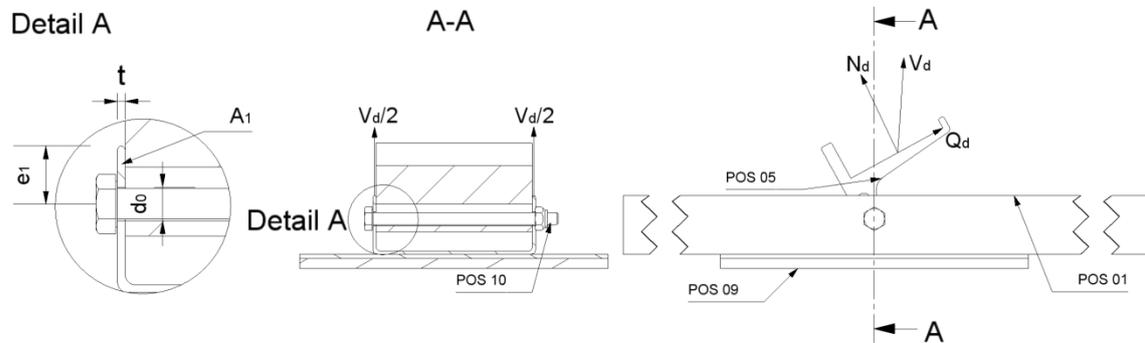
Nachweis im Anschlussbereich zu POS. 05 – Modulaufleger untenMNW = 15 °; LK 5 maßgebend: $N_d = -2,77 \text{ kN}$, $Q_{z,d} = -1,16 \text{ kN}$ 

Abbildung 5.1: Anschlussbereich POS 01 zu POS 05

Spannungsnachweis im Restquerschnitt:

$$A_1 = \left(e_1 - \frac{d_0}{2} \right) * t = \left(1,13 - \frac{0,66}{2} \right) * 0,15 = 0,12 \text{ cm}^2 \quad [5.15]$$

$$e_1 = 1,2 * d_0 = 1,2 * 0,66 = 0,79 \text{ cm} \quad \text{gewählt } e_1 = 1,13 \text{ cm} \quad [5.16]$$

$$V_d = \frac{1}{2} \sqrt{N_d^2 + Q_d^2} = \frac{1}{2} \sqrt{(-1,16)^2 + (-2,77)^2} = 1,50 \text{ kN} \quad [5.17]$$

$$V_{t,Rd} = \frac{A_1 * f_{uk}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,12 * 21,5}{1,25} = 2,06 \text{ kN} \quad [5.18]$$

$$V_d = 1,22 \text{ kN} < 2,06 \text{ kN} = V_{t,Rd} \quad \checkmark \quad [5.19]$$

Hinweis:

Aufgrund von Kerbbruchgefahr dürfen diese Löcher nicht gestanzt werden.

Lochleibung:

$$V_{l,d} = 1,50 \text{ kN} \quad [5.20]$$

$$V_{l,Rd} = \frac{2,5 * \alpha * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 0,57 * 21,5 * 0,6 * 0,15}{1,25} = 2,21 \text{ kN} \quad [5.21]$$

$$\alpha \leq \left. \begin{array}{l} e_1/3 * d_0 = 1,31/3 * 0,66 = 0,57 \\ f_{ub}/f_u = 700/215 = 1,86 \\ 1,0 \end{array} \right\} 0,57 \text{ maßgebend} \quad [5.22]$$

$$V_{l,d} = 1,50 \text{ kN} < 2,21 \text{ kN} = V_{l,Rd} \quad \checkmark \quad [5.23]$$

Abscheren:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 * f_{ub} * A_{Sch}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 * 700 * (\pi * 0,6^2/4)}{1,25} = 79,17 \text{ kN} \quad [5.24]$$

$$F_{v,Ed} = 1,50 \text{ kN} \ll 79,17 \text{ kN} = F_{v,Rd} \quad \checkmark \quad [5.25]$$

Gewählt: Sechskantschraube M6 x 90 A2 mit selbstsichernder Mutter;

Loch 6,6 mm; $e_1 = 1,31 \text{ cm}$

Nachweis der Auflagerpressung

MNW = 20 °; LK 1 maßgebend; $A_{vd} = 1,97 \text{ kN}$; $\sigma_{zul} = 100 \text{ kN/m}^2 = 10 \text{ N/cm}^2$ Druckspannung bei 10 % Stauchung nach DIN EN 4108-10 [III] (z.B. Dämmstoff ESP DAA dm)

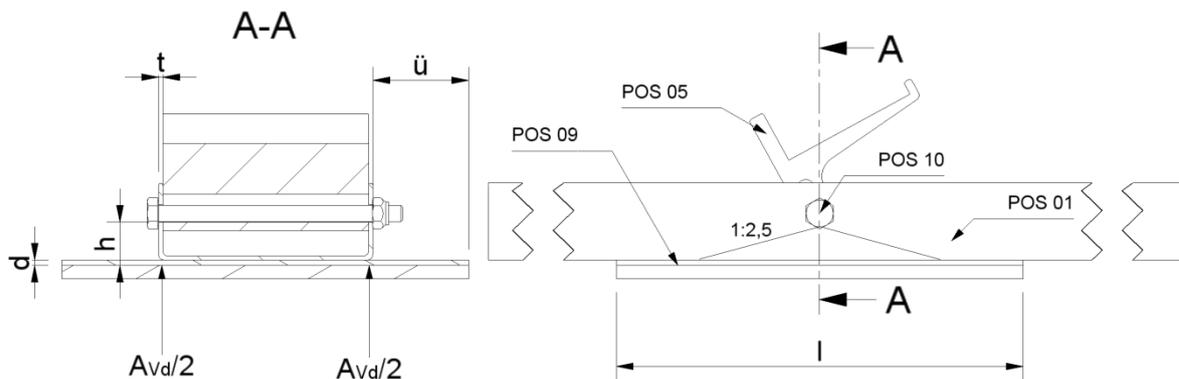


Bild 5.4: Maximale Auflagerkraft in POS 01

$$l = 5 * h + 2 * \ddot{u} = 5 * 1,4 + 2 * 3,6 = 14,20 \text{ cm} \quad [5.26]$$

$$A = 2 * (l * (2\ddot{u} + t)) = 2 * (14,20 * (2 * 3,5 + 0,15)) = 203,06 \text{ cm}^2 \quad [5.27]$$

$$\sigma_d = \frac{A_{vd}}{A} = \frac{1970}{203,06} = 9,70 \text{ N/cm}^2 \quad [5.28]$$

$$\sigma_d = 9,70 \text{ N/cm}^2 < 10 \text{ N/cm}^2 = \sigma_{zul} \quad [5.29]$$

Hinweis:

Bei Dämmstoffen mit geringeren zul. Druckspannungen (z.B. MW DAA $\sigma_{zul} = 60 \text{ kN/m}^2$) müssen zusätzliche Maßnahmen getroffen werden bzw. die maximale Auflagerkraft in Abhängigkeit vom Standort und Gebäudehöhe ermittelt werden.

$$Q_{z,d} = \sigma_{E,d} * \ddot{u} = 9,90 * 3,6 = 34,92 \text{ N/cm} \quad [5.30]$$

$$M_{y,d} = \frac{Q_{z,Ed}}{2} * \left(\ddot{u} + \frac{t}{2} \right) = \frac{34,92}{2} * \left(3,6 + \frac{0,15}{2} \right) = 64,17 \text{ Ncm/cm} \quad [5.31]$$

$$Q_{z,Rd} = \frac{f_{0,2}}{\gamma_{M1} * \sqrt{3}} * d = \frac{16 * 10^3}{1,1 * \sqrt{3}} * 0,2 = 839,8 \text{ N/cm} \quad [5.32]$$

$$M_{y,Rd} = W_y * \frac{f_{0,2}}{\gamma_{M1}} * \alpha_{pl,y} = 0,0066 * \frac{16 * 10^3}{1,1} * 1,14 = 110,55 \text{ Ncm/cm} \quad [5.33]$$

$$W_y = \frac{1,0 * d^2}{6} = \frac{1,0 * 0,2^2}{6} = 0,0066 \text{ cm}^3 \quad [5.34]$$

$$M_{y,Ed} = 64,17 \text{ Ncm/cm} < 110,55 \text{ Ncm/cm} = M_{y,Rd} \quad [5.35]$$

5.11.2 POS 02 – Stützprofil

Verhältnis Nettoquerschnitt zu Bruttoquerschnitt

$$\frac{A_{Netto}}{A} = \frac{2,21}{2,59} = 0,85 > 0,74 = \frac{16}{21,5} = \frac{f_{0,2}}{f_{u,k}} \quad [5.36]$$

Nachweis des Biegequerschnitts

MNW = 15 °; LK 2 maßgebend; $N_d = -2,56 \text{ kN}$, $M_{y,d} = 0,08 \text{ kNm}$

$$\sigma_d = \frac{N_d}{A} \pm \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{-2,56}{2,59} \pm \frac{0,08 * 10^2}{0,61} = \begin{cases} -14,10 \text{ kN/cm}^2 \\ +12,13 \text{ kN/cm}^2 \end{cases} \quad [5.37]$$

$$f_{0,2d} = \frac{f_{0,2k}}{\gamma_{M1}} = \frac{16,0}{1,1} = 14,55 \text{ kN/cm}^2 \quad [5.38]$$

$$\sigma_d = 14,10 \text{ kN/cm}^2 < 14,55 \text{ kN/cm}^2 = f_{0,2d} \quad \checkmark \quad [5.39]$$

Nachweis der Schubspannungen

MNW = 15 °; LK 2 maßgebend; $Q_d = -0,72 \text{ kN}$; $A_z = 0,43 \text{ cm}^2$;

$$\tau_d = \frac{Q_{Ed}}{A_z} = \frac{-0,72}{0,43} = -1,67 \text{ kN/cm}^2 \quad [5.40]$$

$$\tau_{0,2d} = \frac{f_{0,2k}}{\gamma_{M1} * \sqrt{3}} = \frac{16}{1,1 * \sqrt{3}} = 8,40 \text{ kN/cm}^2 \quad [5.41]$$

$$\tau_d = 1,67 \text{ kN/cm}^2 < \tau_{0,2d} = 8,40 \text{ kN/cm}^2 \quad \checkmark \quad [5.42]$$

Stabilitätsnachweis

Der Biege-Knicknachweis wurde mit der Software KAPPA von Dlubal geführt.
MNW = 15 °; LK 2 maßgebend (vgl. Anhang E).

Nachweis im Anschlussbereich zu POS 04 – Modulaufleger oben

MNW = 15 °; LK 5 maßgebend: $N_d = -2,14 \text{ kN}$, $Q_{z,d} = -1,16 \text{ kN}$

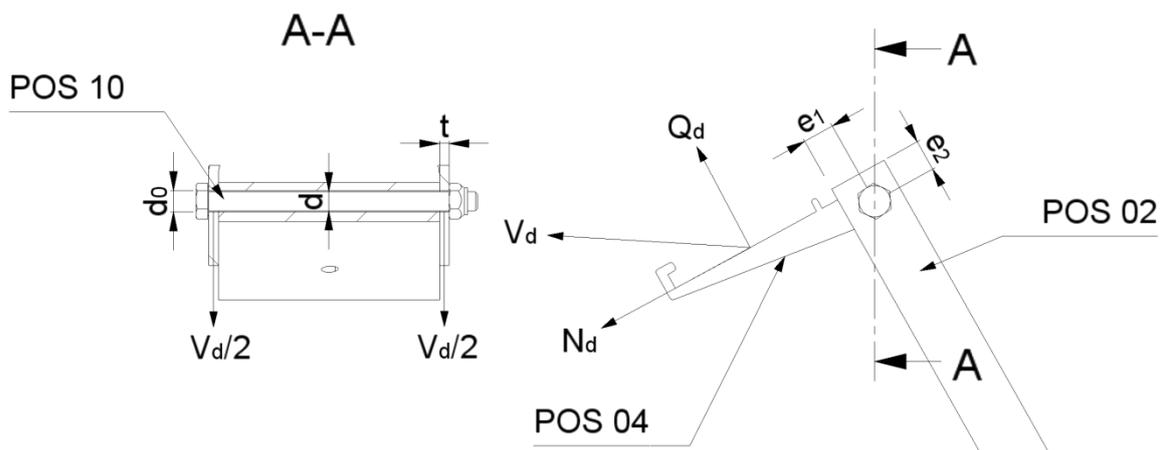


Bild 5.5: Anschlussbereich POS 02 zu POS 04

$$A_1 = \left(e_1 - \frac{d_0}{2} \right) * t = \left(0,83 - \frac{0,66}{2} \right) * 0,3 = 0,15 \text{ cm}^2 \quad [5.43]$$

$$e_{1,2} = 1,2 * d_0 = 1,2 * 0,66 = 0,79 \text{ cm} \quad \text{gewählt } e_{1,2} = 0,83 \text{ cm} \quad [5.44]$$

$$V_d = \frac{1}{2} \sqrt{N_d^2 + Q_d^2} = \frac{1}{2} \sqrt{(-2,37)^2 + (-1,16)^2} = 1,32 \text{ kN} \quad [5.45]$$

$$V_{t,Rd} = \frac{A_1 * f_{uk}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,15 * 21,5}{1,25} = 2,58 kN \quad [5.46]$$

$$V_d = 1,32 kN < 2,58 kN = V_{t,Rd} \quad \checkmark \quad [5.47]$$

Hinweis:

Aufgrund von Kerbbruchgefahr dürfen diese Löcher nicht gestanzt werden.

Lochleibung:

$$F_{V,Ed} = 1,32 kN \quad [5.48]$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 * \alpha * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 0,42 * 21,5 * 0,6 * 0,3}{1,25} = 3,25 kN \quad [5.49]$$

$$\alpha \leq \left. \begin{array}{l} e_1/3 * d_0 = 0,83/3 * 0,66 = 0,42 \\ f_{ub}/f_u = 700/215 = 1,86 \\ 1,0 \end{array} \right\} 0,42 \text{ maßgebend} \quad [5.50]$$

$$F_{v,Ed} = 1,32 kN < 3,25 kN = F_{b,Rd} \quad \checkmark \quad [5.51]$$

Abscheren:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 * f_{ub} * A_{Sch}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 * 700 * (\pi * 0,6^2/4)}{1,25} = 79,17 kN \quad [5.52]$$

$$F_{v,Ed} = 1,32 kN \ll 79,17 kN = F_{v,Rd} \quad \checkmark \quad [5.53]$$

Gewählt: Sechskantschraube M6 x 90 A2 mit selbstsichernder Mutter;

Loch 6,6 mm; $e_1 = 1,16$ cm

5.11.3 POS 03 – Koppelprofil

Die Konstruktion wird in mehreren hintereinander liegenden, miteinander verbundenen Winkelstützen realisiert, die durch Koppelprofile miteinander verbunden sind. Dadurch ergibt sich eine dem Scheddach ähnliche Situation, so dass die c_{pe} Werte für die innen liegenden Winkelstützen nach DIN EN 1991-4 [VIII], Bild 7.10 um 40 % herabgesetzt werden (vgl. Anhang D) Die Koppelprofile nehmen abhebbende Lasten auf. Der maßgebende Belastungsfall ergibt sich bei dem maximalen Modulreihenabstand (MNW = 30 °).

Nachweis des Druckstabes

MNW = 30 °; LK 4 maßgebend; $N_d = 2,52 \text{ kN}$

$$N_{t,Rd} = \frac{A * f_{0,2,k}}{\gamma_{M1}} = \frac{2,59 * 16,0}{1,1} = 37,67 \text{ kN} \quad [5.54]$$

$$N_d = 2,52 \text{ kN} < 37,67 \text{ kN} = N_{t,Rd} \quad \checkmark \quad [5.55]$$

Stabilitätsnachweis

Der Biege-Knicknachweis wurde mit der Software KAPPA von Dlubal geführt.
MNW = 30 °; LK 4 maßgebend (vgl. Anhang E)

Nachweis im Anschlußbereich zu POS 01 – Fußprofil

MNW = 30 °; LK 4 maßgebend;

$N_d = 1,15 \text{ kN}$; $A_{v2d} = 0,08 \text{ kN}$; $A_{v3d} = 0,06 \text{ kN}$ (vgl. Anhang D);

$l_{ws} = 1,48 \text{ m}$; $\max.d_M = 2,69 \text{ m}$ (vgl. Gl. 3.2) für den nördlichsten Breitengrad in

Deutschland BG = 55 ° und $\gamma_1 = 11 \text{ °}$.

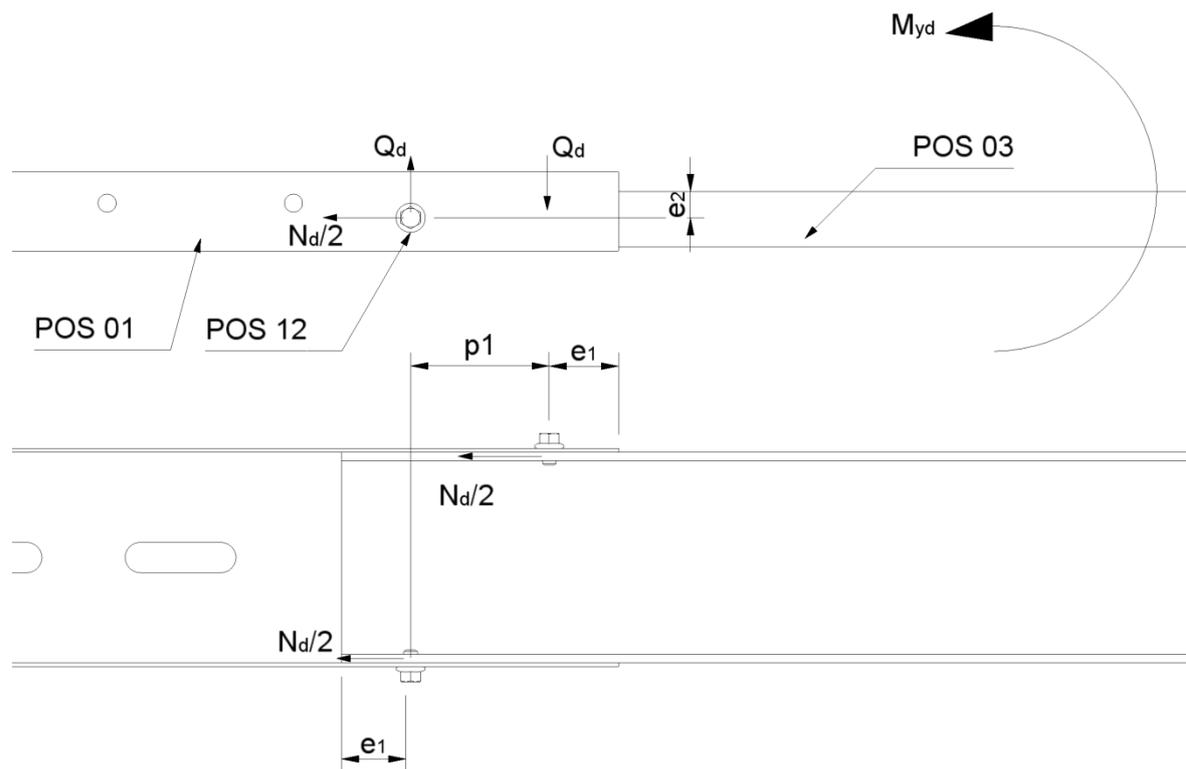


Bild 5.6: Anschlussbereich POS 01 zu POS 03

$$l_{KP} = \max.d_M - l_{WS} + 0,20 = 2,69 - 1,48 + 0,20 = 1,41 \text{ m} \quad [5.56]$$

$$M_{yd} = (A_{v2d} - A_{v3d}) * l_{KP} = (0,08 - 0,06) * 1,41 * 10^3 = 28,2 \text{ Nm} \quad [5.57]$$

$$\text{gewählt: } e_1 = 2,5 \text{ cm; } e_2 = 1 \text{ cm; } p_1 = 5 \text{ cm} \quad [5.58]$$

$$V_{zd} = \frac{M_{yd}}{p_1} + \frac{N_d}{2} = \frac{28,2 * 10^3}{0,05} + \frac{1,15}{2} = 1,14 \text{ kN} \quad [5.59]$$

$$V_{Rd} = \frac{V_{Rk}}{\gamma_{M2}} = \frac{2,13}{1,25} = 1,70 \text{ kN} \quad [5.60]$$

Lochleibung:

$$V_{ld} = 1,14 \text{ kN} \quad [5.61]$$

$$V_{l,Rd} = \frac{2,5 * \alpha * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 0,61 * 21,5 * 0,55 * 0,15}{1,25} = 2,16 \text{ kN} \quad [5.62]$$

$$\alpha \leq \left. \begin{array}{l} e_2/3 * d_0 = 1,00/3 * 0,55 = 0,61 \\ f_{ub}/f_u = 700/215 = 1,86 \\ 1,0 \end{array} \right\} 0,57 \text{ maßgebend} \quad [5.63]$$

$$V_{ld} = 1,14 \text{ kN} < 2,16 \text{ kN} = V_{l,Rd} \quad \checkmark \quad [5.64]$$

Abscheren:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 * f_{ub} * A_{Sch}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 * 700 * (\pi * 0,55^2/4)}{1,25} = 66,52 \text{ kN} \quad [5.65]$$

$$F_{v,Ed} = 1,14 \text{ kN} \ll 66,52 \text{ kN} = F_{v,Rd} \quad \checkmark \quad [5.66]$$

Gewählt: 2 x selbstbohrende Schraube, Sechskantkopf mit Bund, $\varnothing 5,5 \times 16 \text{ A2}$

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der konstruktiven Arbeit und der statischen Bemessungen werden in diesem Kapitel zusammenfassend dargestellt: Hierbei wird der optimierte Entwurf als zentrales Ergebnis dieser Arbeit besonders hervorgehoben. Weiterhin werden die notwendigen Schritte zur Markteinführung des Systems aufgezeigt.

6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch die Betrachtung der bautechnischen Eigenschaften von Flachdächern wurde als Produktart ein windoptimiertes, und befestigungsloses System als beste Lösung zur Aufständigung von PV-Modulen ermittelt. Mit diesen Systemen ist die Realisierung von PV-Anlagen auch auf Dächern mit geringen Lastreserven möglich.

Gemeinsam mit SIG-Solar wurden Systemanforderungen definiert und ihre Gewichtung festgelegt. Anhand dieser Anforderungen wurde in Form eines ersten Entwurfsvorschlags eine Realisierungsmöglichkeit vorgelegt. Der Entwurf beinhaltet folgende grundsätzliche Entscheidungen:

- ◆ Durch Simulationen konnte die Abhängigkeit des Ertrags einer PV-Anlage von dem Neigungswinkel der Module gezeigt werden. Die Betrachtung zeigt, dass ein System mit stufenlos verstellbarem Neigungswinkel nicht notwendig ist. Ein System mit definierten Stellmöglichkeiten ermöglicht eine einfachere Konstruktion und ist damit auch potentiell kostengünstiger.
- ◆ Als Werkstoff wurde Aluminium gewählt, da es witterungsbeständig, leicht zu bearbeiten wiederverwertbar und ausreichend verfügbar ist. Das geringe Eigengewicht von Aluminium ermöglicht eine leichte Konstruktion. In Verbindung mit dem Strangpressverfahren können Bauteile in großen Mengen wirtschaftlich produziert werden.
- ◆ Zur Funktionstauglichkeit wurde die Gewährleistung des Wasserablaufes die Hinterlüftung der Module, Einbindung eines Modulwechselrichters und die Eigenschaften von bauphysikalischen Schichten berücksichtigt.

Im nächsten Schritt wurden Optimierungen an der Formstruktur des Systems, in einem zweiten detaillierteren Entwurf erarbeitet. Durch die Optimierungen ergaben sich wirtschaftliche Vorteile.

Die wesentliche Änderung war der Einsatz von punktförmigen Modulauflagern an Stelle eines durchgehenden Modulträgerprofils. Hierdurch werden Material eingespart und die Gesamtkosten des Systems verringert. Allerdings wird durch die Anpassung des Systems die Einsatzfähigkeit auf einen Modultyp beschränkt.

Die Formgebung der Modulauflager, in Verbindung mit der Vorkonfektionierung des Systems unter Werkstattbedingungen, ermöglicht eine schnelle Montage vor Ort. Die Module werden in die Modulauflager eingelegt und befestigt. Durch die Zeitersparnis ergeben sich geringere Montagekosten.

Aufgrund der punktförmigen Auflagerung ergeben sich modulseitige Belastungen, die vom Modulhersteller noch nicht untersucht wurden. Um die Funktionsfähigkeit des Moduls zu gewährleisten, wurden im Rahmen der Diplomarbeit mechanische Lastprüfungen beim Fraunhofer Institut durchgeführt. Die Prüfung hat gezeigt, dass durch die punktförmige Auflagerung kein Risiko für das Modul entsteht.

Zur Bauteilerprobung fand eine Auseinandersetzung mit den gesetzlichen Forderungen statt. Als sonstige Bauprodukte müssen PV-Module, inklusive ihrer Befestigung die Anforderungen der Standsicherheit erfüllen. Hierzu gehört die statische Bemessung der einzelnen Bauteile sowie projektspezifisch der gesamten Anlage.

Die Standsicherheit der gesamten Anlage ist im Wesentlichen von der Windbelastung abhängig. Um diese Belastung zu beschreiben wurde, aus Mangel an Alternativen, zu den vom Normausschuss ermittelten Lastbeiwerten gegriffen. Mit diesen Werten war es nicht möglich die Standsicherheit des Systems nachzuweisen. Durch Untersuchungen unter Realbedingungen könnten die Windlasten präziser beschrieben werden. Mit den daraus resultierenden Ergebnissen könnten exakte Standsicherheitsnachweise geführt werden.

In der statischen Bemessung wurden die Abmessungen der Querschnitte sowie die Anschlüsse nachgewiesen. Es konnte gezeigt werden, dass mit zunehmendem MNW die abhebenden Kräfte abnehmen und horizontale Kräfte zunehmen. Durch Kopplung der Modulreihen können die verbleibenden abhebenden Kräfte aufgenommen werden. Der horizontalen Verschiebung wirken Reibungswiderstände in den Auflagern entgegen, die vom Reibungskoeffizienten und von der vertikalen Last am Auflager abhängen. Um den Widerstand genau zu beschreiben, müssten die Koeffizienten, unter Berücksichtigung der vorliegenden Materialien, experimentell ermittelt werden. Bei verbleibenden horizontalen Lasten müssten konstruktive Maßnahmen wie z.B. örtlich gezielte Beschwerung getroffen werden.

Die einzelnen Bauteile des optimierten Entwurfs wurden hinsichtlich der Tragfähigkeit nach den gängigen Normen des Ingenieurwesens überprüft. Die Systemstatik beinhaltet die relevanten Standsicherheitsnachweise. Um das System für den „allgemeinen“ Anwendungsfall zu dimensionieren und somit eine wirtschaftliche Lösung zu gewährleisten sind „exponierte Lagen“ (Küstengebiete, Bergregionen) von der Bemessung ausgeschlossen worden.

Basierend auf den Ergebnissen der statischen Bemessung konnten Konstruktionszeichnungen für die einzelnen Komponenten erstellt werden. Der Bau eines Prototyps wird dadurch ermöglicht.

Mit einem windoptimierten Aufständersystem kann die Belastung der Dachkonstruktion erheblich verringert werden. Im Vergleich zu herkömmlichen Aufständersystemen, bei denen eine Beschwerung von etwa 100 kg/m^2 Modulfläche notwendig ist kommt das windoptimierte Aufständersystem mit einem Eigengewicht von ca. 4 kg/m^2 Modulfläche aus (vgl. Anhang B). Zertifizierte Systeme zeigen, dass die Gewährleistung der Standsicherheit bei diesem geringen Eigengewicht realisierbar ist.

6.2 Ausblick

Aus der nachfolgenden Übersicht ergeben sich die notwendigen Arbeitsschritte die an die Diplomarbeit anschließen. Die Produktentwicklung bis zur Serienproduktion wird anhand einer gängigen methodischen Vorgehensweise beschrieben (vgl. Bild 6.1) [18].

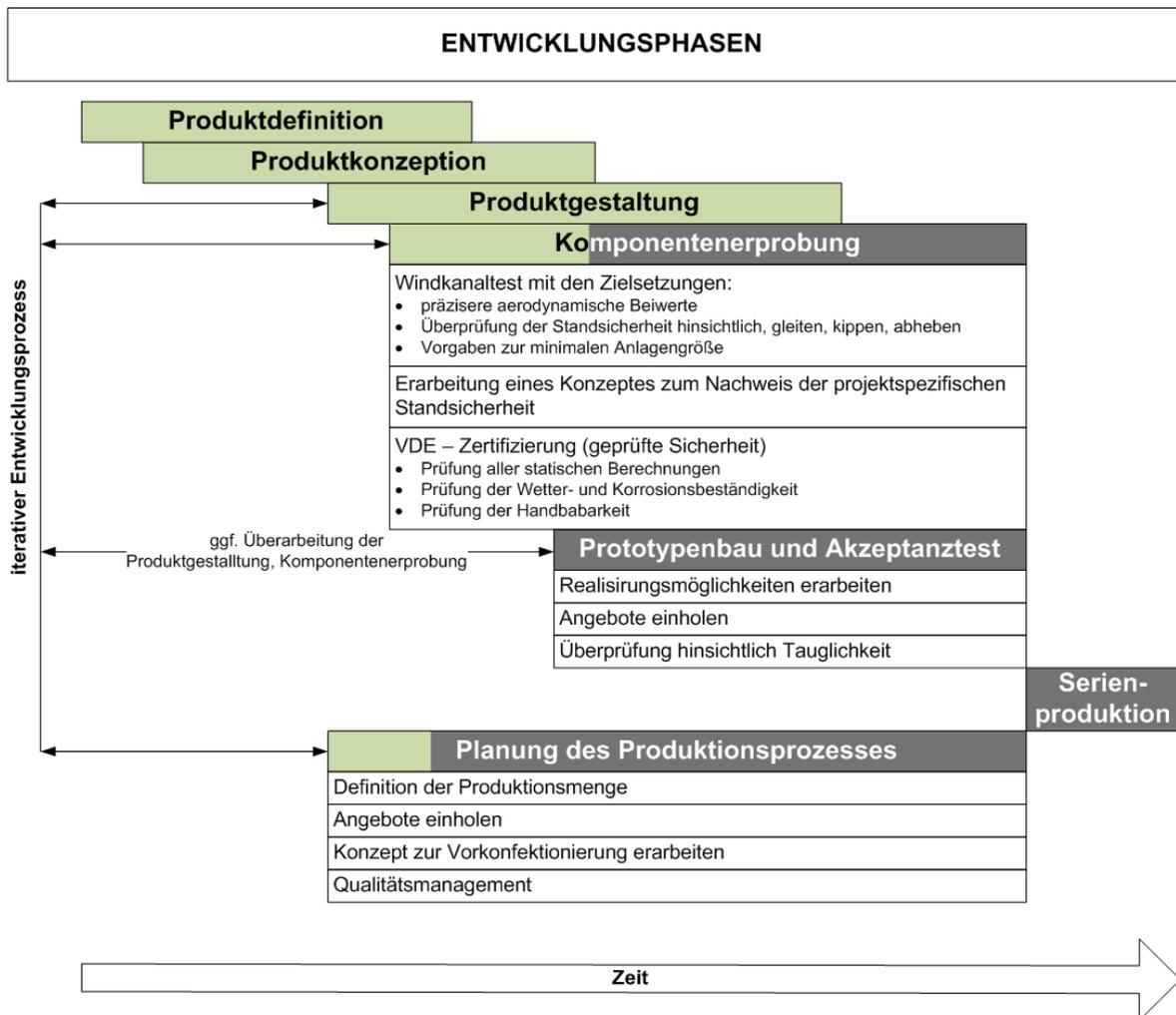


Bild 6.1: Entwicklungsphasen von Produkten

Im Rahmen der Diplomarbeit war es möglich einige Phasen der Entwicklung ganz bzw. teilweise zu erarbeiten. Bis zur Realisierung einer Serienproduktion ist eine Vertiefung bereits bearbeiteter sowie die Erarbeitung weiterer Entwicklungsphasen notwendig. Bild 6.1 gibt einen Überblick über die bereits erarbeiteten Entwicklungsphasen (grün) sowie die zu bearbeitenden Phasen (grau).

In der Phase der Komponentenerprobung müssten technische Untersuchungen eingeleitet werden, die genauere Ergebnisse liefern und dadurch die Sicherheit gewährleisten. Die Ergebnisse würden unter Berücksichtigung weiterer Parameter (z.B. Anlagenstandort, Gebäudeabmessungen, Art der Dachdichtung) in ein Konzept zum Nachweis der Standsicherheit der gesamten Anlage herangezogen werden.

Um den Kunden die Produktsicherheit zu gewährleisten ist eine unabhängige Überprüfung notwendig. Diese könnte z.B. beim Verband-Der-Elektrotechnik (VDE) durchgeführt werden. Durch das Zertifikat würde das Produkt den Geprüfte-Sicherheit-Siegel (GS) tragen. Dieses Siegel besagt, dass das Produkt den Anforderungen des Geräte- und Produktsicherheitsgesetzes entspricht und somit unbedenklich eingesetzt werden darf. Für die Zertifizierung müsste dem VDE Folgendes vorgelegt werden:

- ◆ Aufbau sowie Standsicherheit der Konstruktion (Systemstatik).
- ◆ Konzept zur Nachweisführung der projektspezifischen Standsicherheit
- ◆ Detaillierte Montageanleitung
- ◆ Prototyp incl. Module

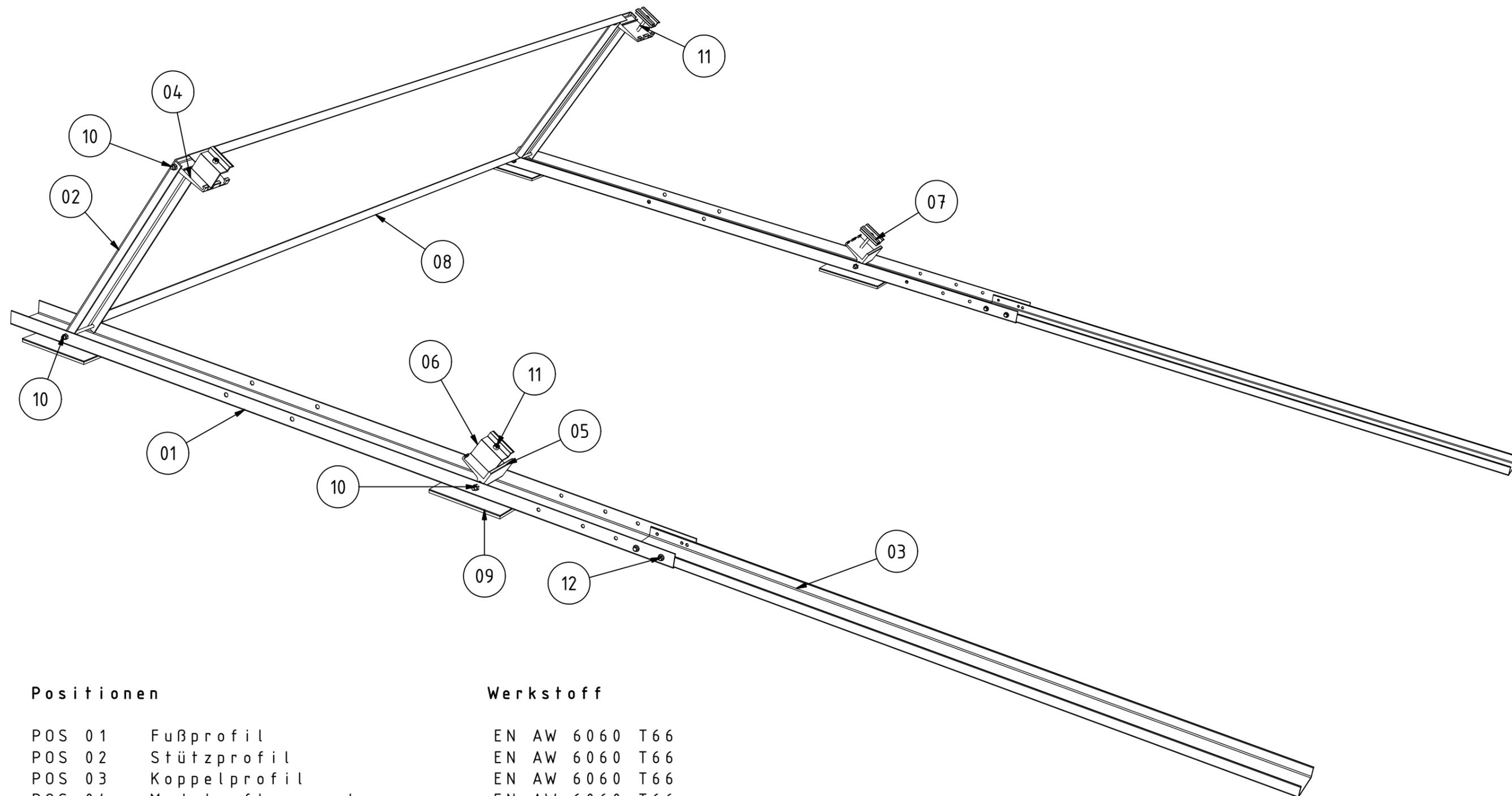
Um die Tauglichkeit des Systems zu überprüfen, muss einen Prototyp in geringer Stückzahl produziert werden. Da dies im Strangpressverfahren zu kostspielig wäre, sind andere Realisierungsmöglichkeiten zu erarbeiten.

Aus Erkenntnissen beim Prototypenbau und der damit verbundenen weiteren Komponentenerprobung müssten ggf. Änderungen an der Produktgestaltung vorgenommen werden. Diese müssten wiederum überarbeitet und angepasst werden.

Der Produktionsprozess muss geplant werden. Hierzu ist es notwendig die Produktions- und Abnahmemenge zu definieren, die Durchführung der Vorkonfektionierung zu organisieren und Qualitätsstandards fest zu legen.

Neben den technischen Entwicklungsschritten müssten auch kaufmännische Entscheidungen getroffen werden. Hierzu gehören Vertriebs- und Marketingstrategien.

ANHANG A



Positionen

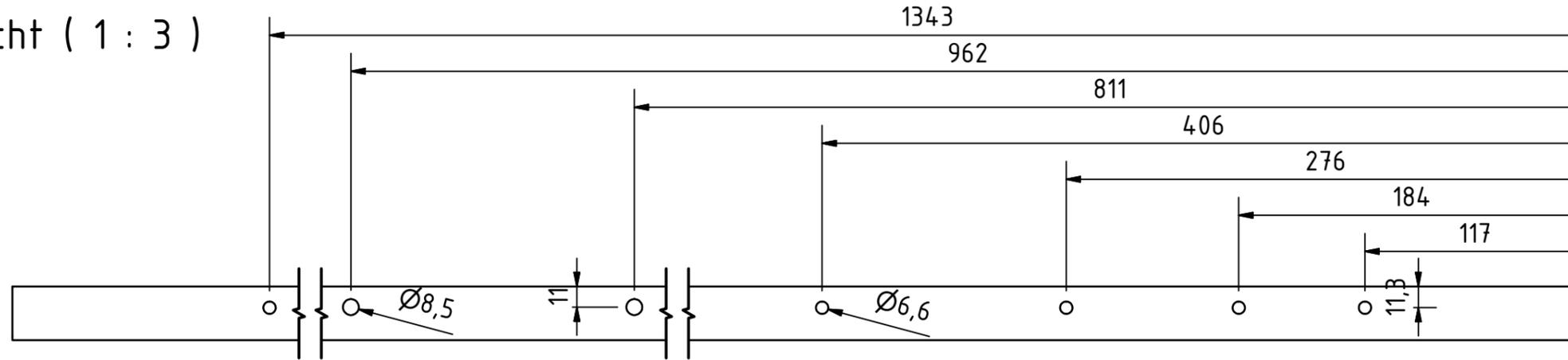
POS 01	Fußprofil
POS 02	Stützprofil
POS 03	Koppelprofil
POS 04	Modulauflager oben
POS 05	Modulauflager unten
POS 06	Modulendklemmen
POS 07	Modulmittelklemme
POS 08	Windleitblech
POS 09	Auflagerplatte Antirutschmatte
POS 10	Gelenkschraube
POS 11	Klemmschraube
POS 12	selbstbohrende Blechschaube

Werkstoff

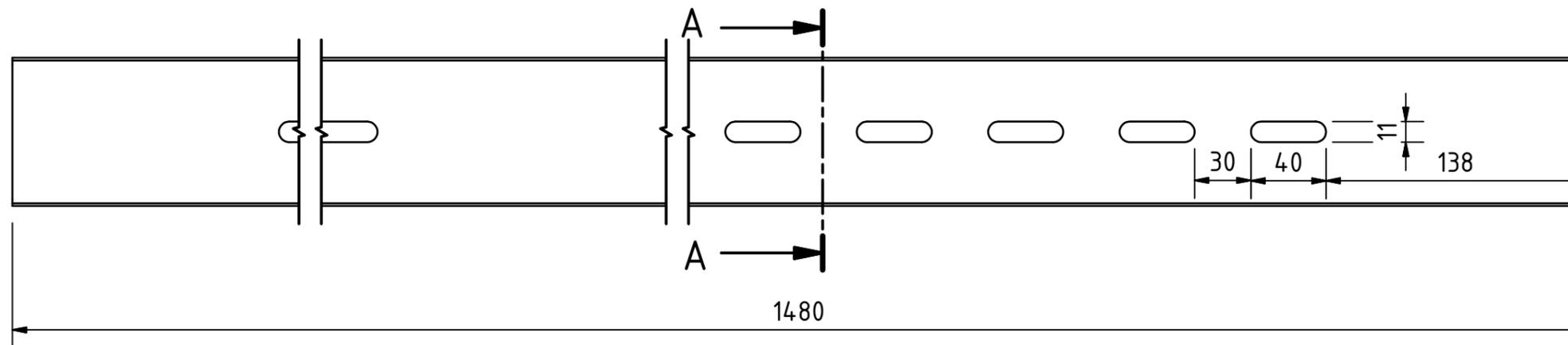
EN AW 6060 T66
EN AW 5754 H22
EN AW 5754 H22
Recycling-Gummigranulat polyurethanegebunden
A2-70
A2-70
A2-70

Status -	
Firma 	Projekt Konzeptionierung eines optimierten Aufständersystems für Photovoltaikanlagen auf Flachdächern
<h1>Positionsplan</h1>	Seite A1
	Format A3
	Maßstab 1 : 8
Gezeichnet: Matthias Halaburda Matrikelnr.: 1805666	
Datum: 06.09.2010	

Seitenansicht (1 : 3)



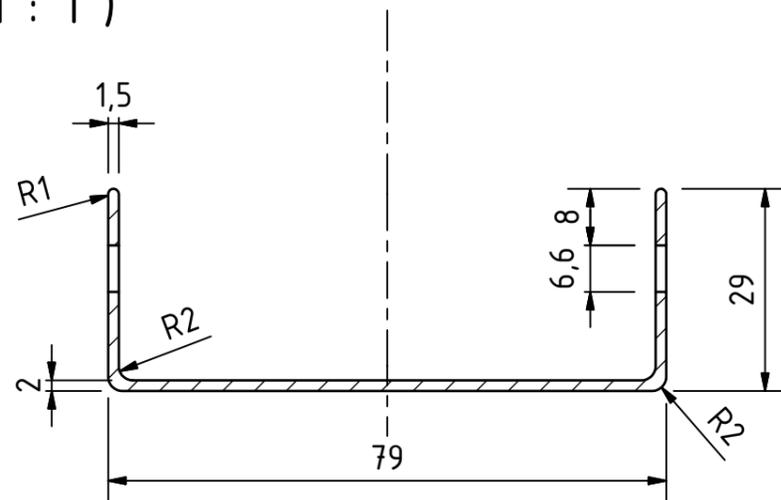
Draufsicht (1 : 3)



Material
EN AW - 6060 T66
g = 2,7 kg/dm³

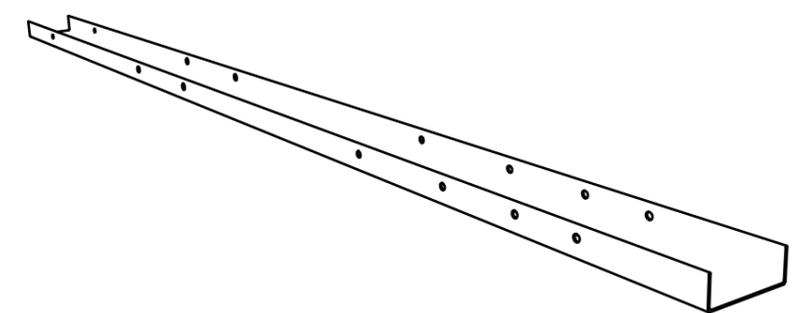
Toleranzen nach:
ISO 2768 - m

A-A (1 : 1)



Status **Konstruktionszeichnung**

Isometrische Darstellung



Firma



Projekt

Konzeptionierung eines optimierten Aufständersystems für Photovoltaikanlagen auf Flachdächern

Bauteil

POS 01 - Fußprofil

Seite

A2

Format

A3

Maßstab

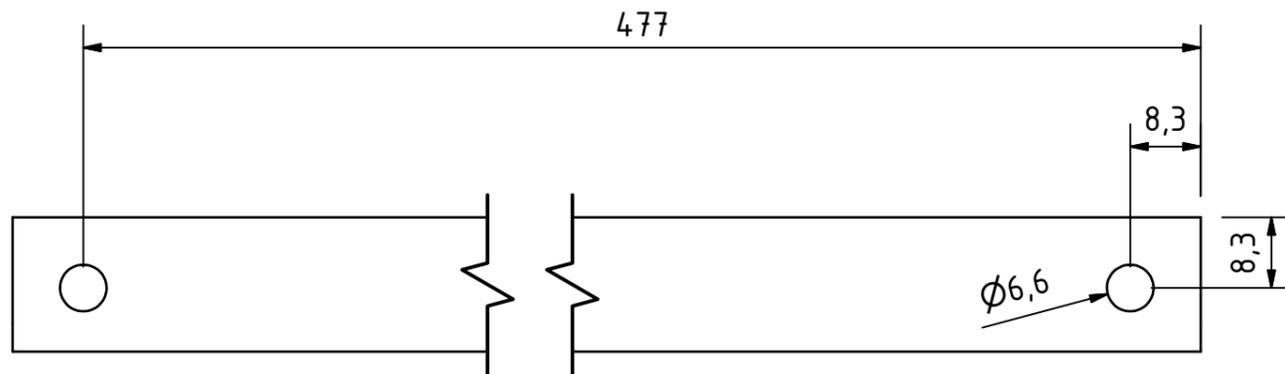
1:3 , 1:1

Gezeichnet: Matthias Halaburda

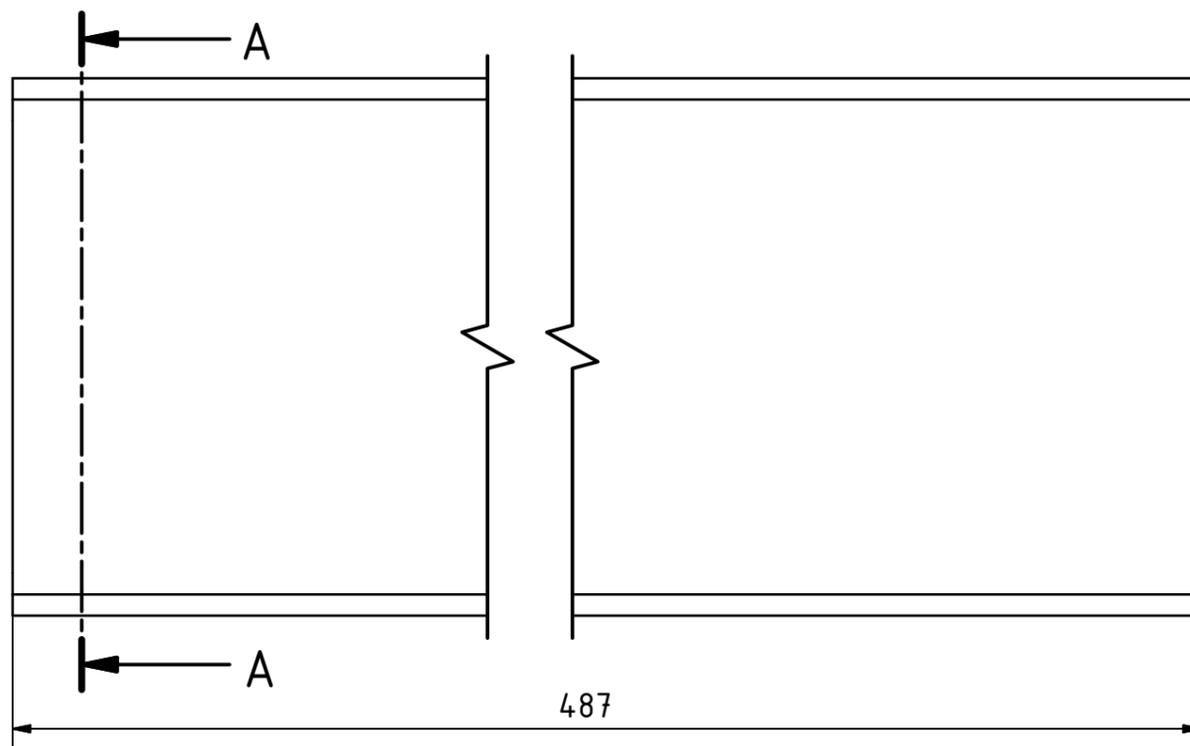
Matrikelnr.: 1805666

Datum: 06.09.2010

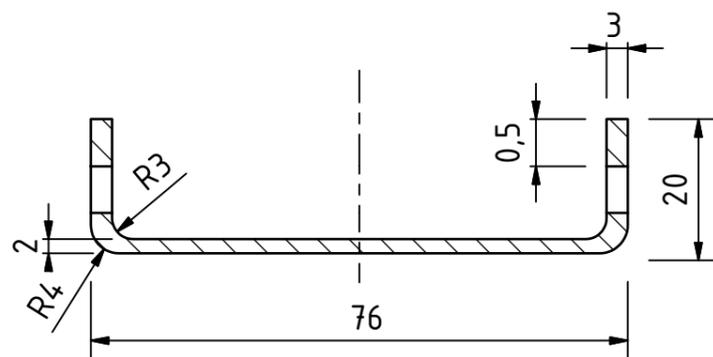
Seitenansicht (1 : 1)



Draufsicht (1 : 1)



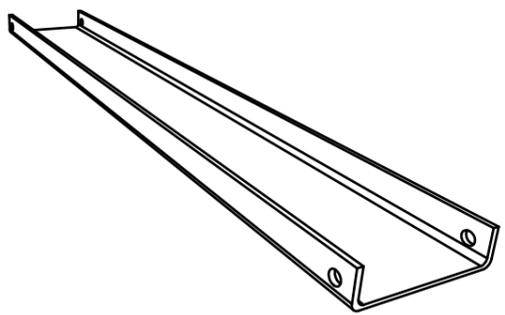
A-A (1 : 1)



Material
 EN AW - 6060 T66
 g = 2,7 kg/dm³

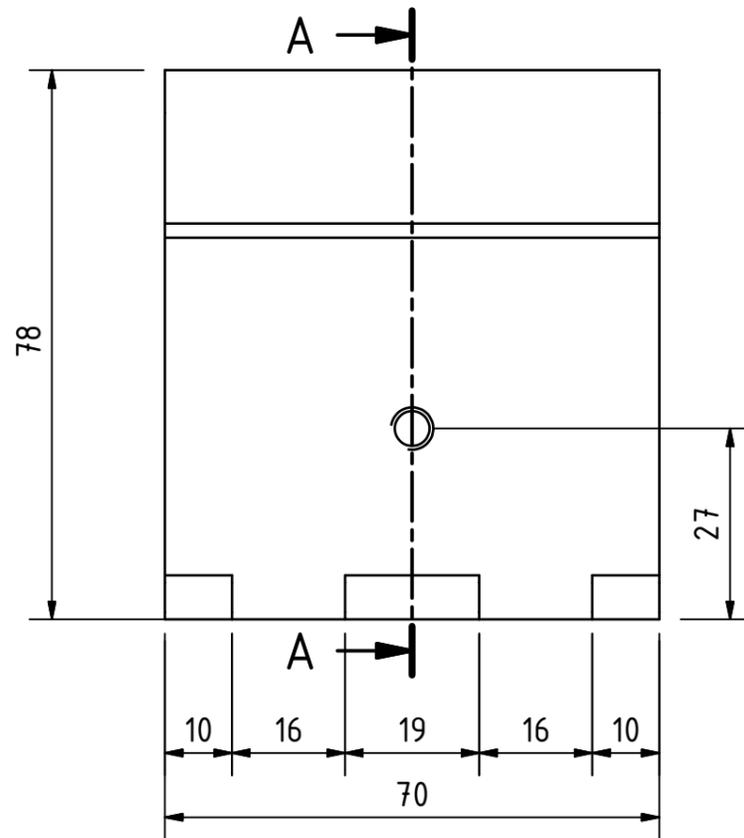
Toleranzen nach:
 ISO 2768 - m

Koppelprofil = Stützprofil (ohne Bohrungen)
 Länge variabel

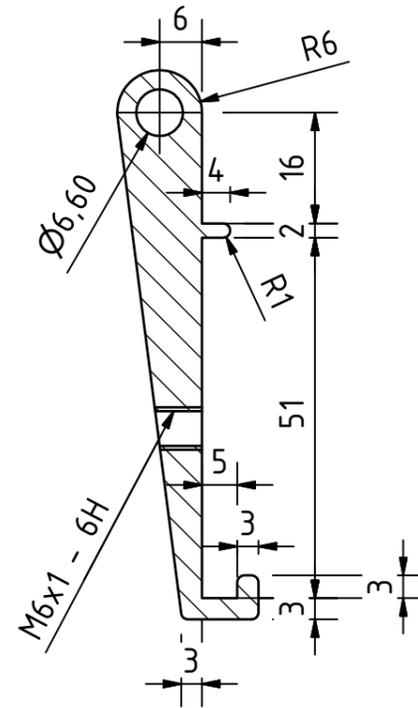
Status	Konstruktionszeichnung		
Isometrische Darstellung			
Firma		Projekt Konzeptionierung eines optimierten Aufständersystems für Photovoltaikanlagen auf Flachdächern	
Bauteil	POS 02 - Stützprofil		Seite A3
	POS 03 - Koppelprofil		Format A3
			Maßstab 1:1
Gezeichnet: Matthias Halaburda Matrikelnr.: 1805666			Datum: 06.09.2010

Draufsicht (1 : 1)

POS 04 - Modulaufleger oben

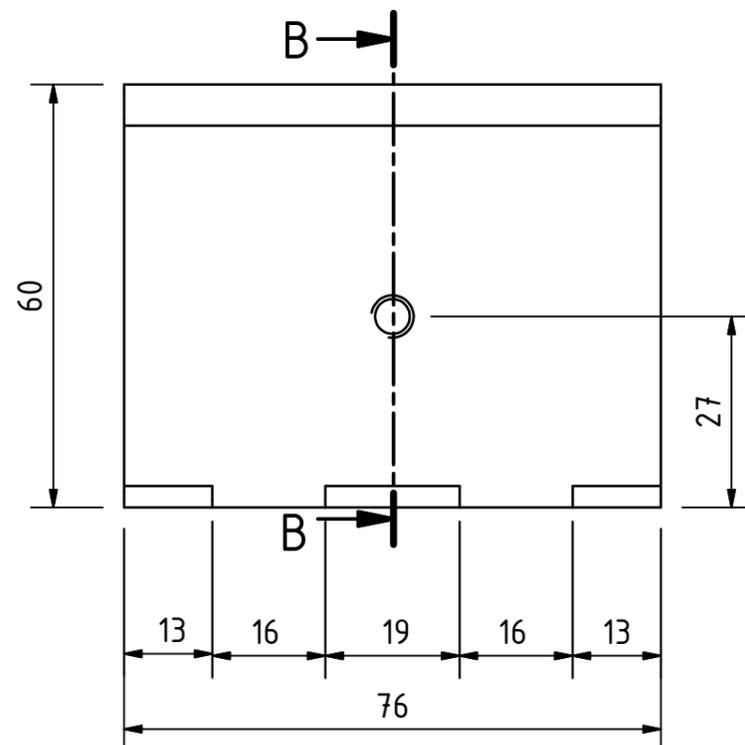


A-A (1:1)

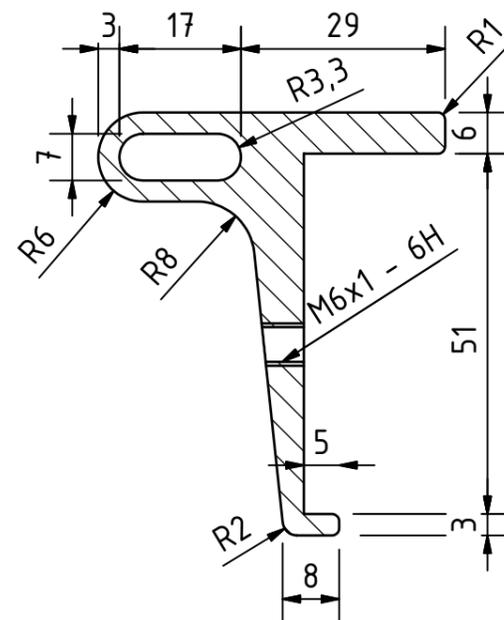


Draufsicht (1 : 1)

POS 05 - Modulaufleger unten



B-B (1:1)



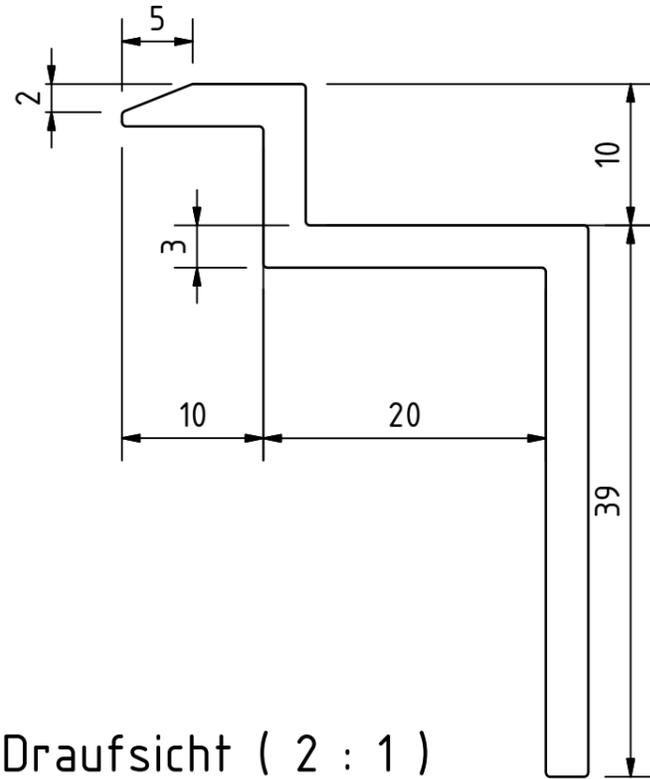
Material
EN AW - 6060 T66
g = 2,7 kg/dm³

Toleranzen nach:
ISO 2768 - m

Status Konstruktionszeichnung	
Isometrische Darstellung	
Firma	Projekt Konzeptionierung eines optimierten Aufständersystems für Photovoltaikanlagen auf Flachdächern
Bauteil POS 04 - Modulaufleger oben POS 05 - Modulaufleger unten	Seite A4 Format A3
	Maßstab 1:1
Gezeichnet: Matthias Halaburda Matrikelnr.: 1805666	Datum: 06.09.2010

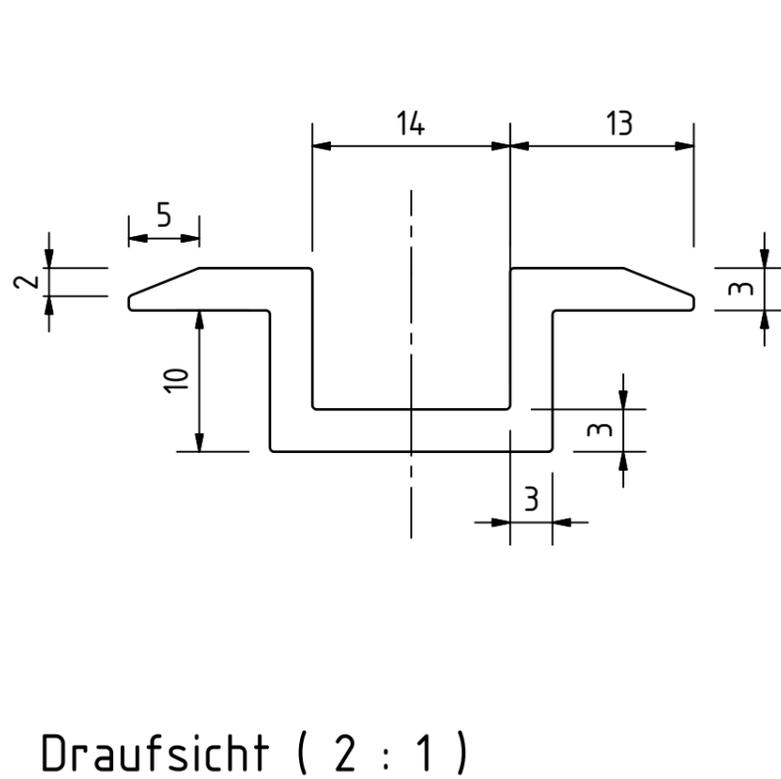
Seitenansicht (2 : 1)

POS 06 - Modulendklemme

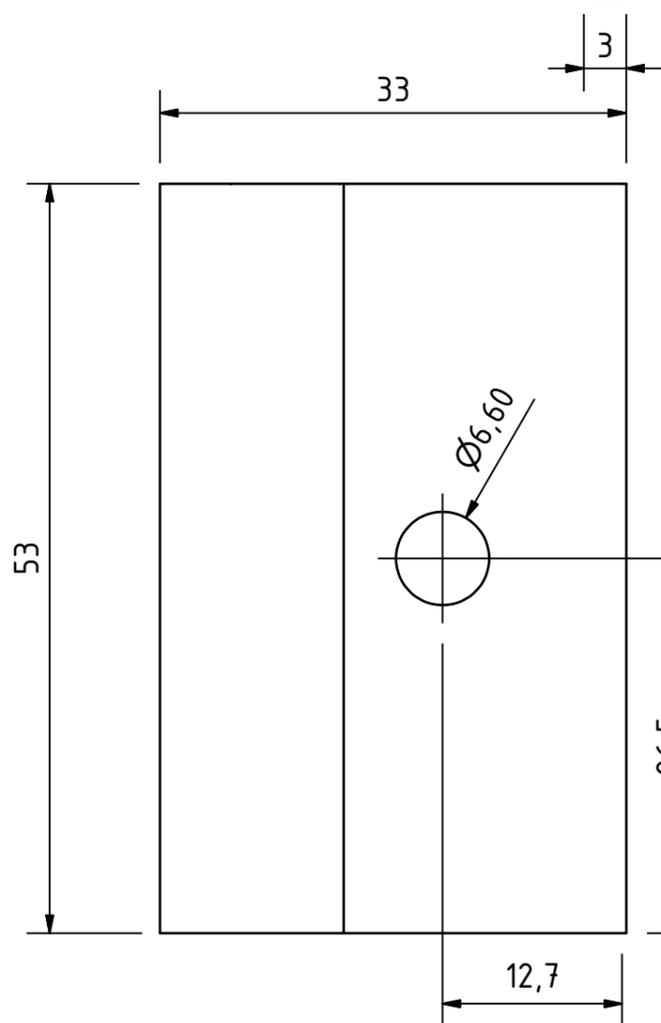


Seitenansicht (2 : 1)

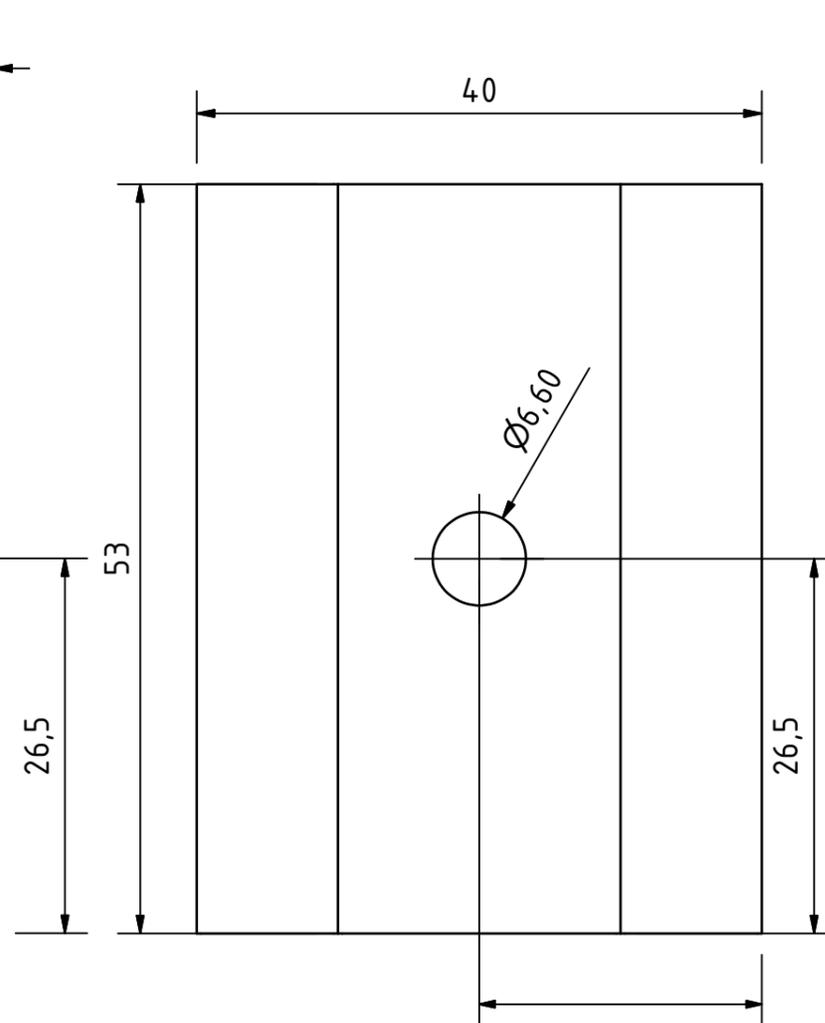
POS 07 - Modulmittelklemme



Draufsicht (2 : 1)

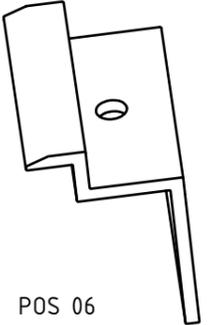
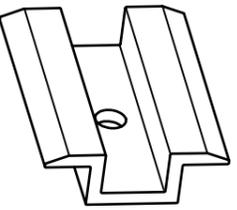


Draufsicht (2 : 1)



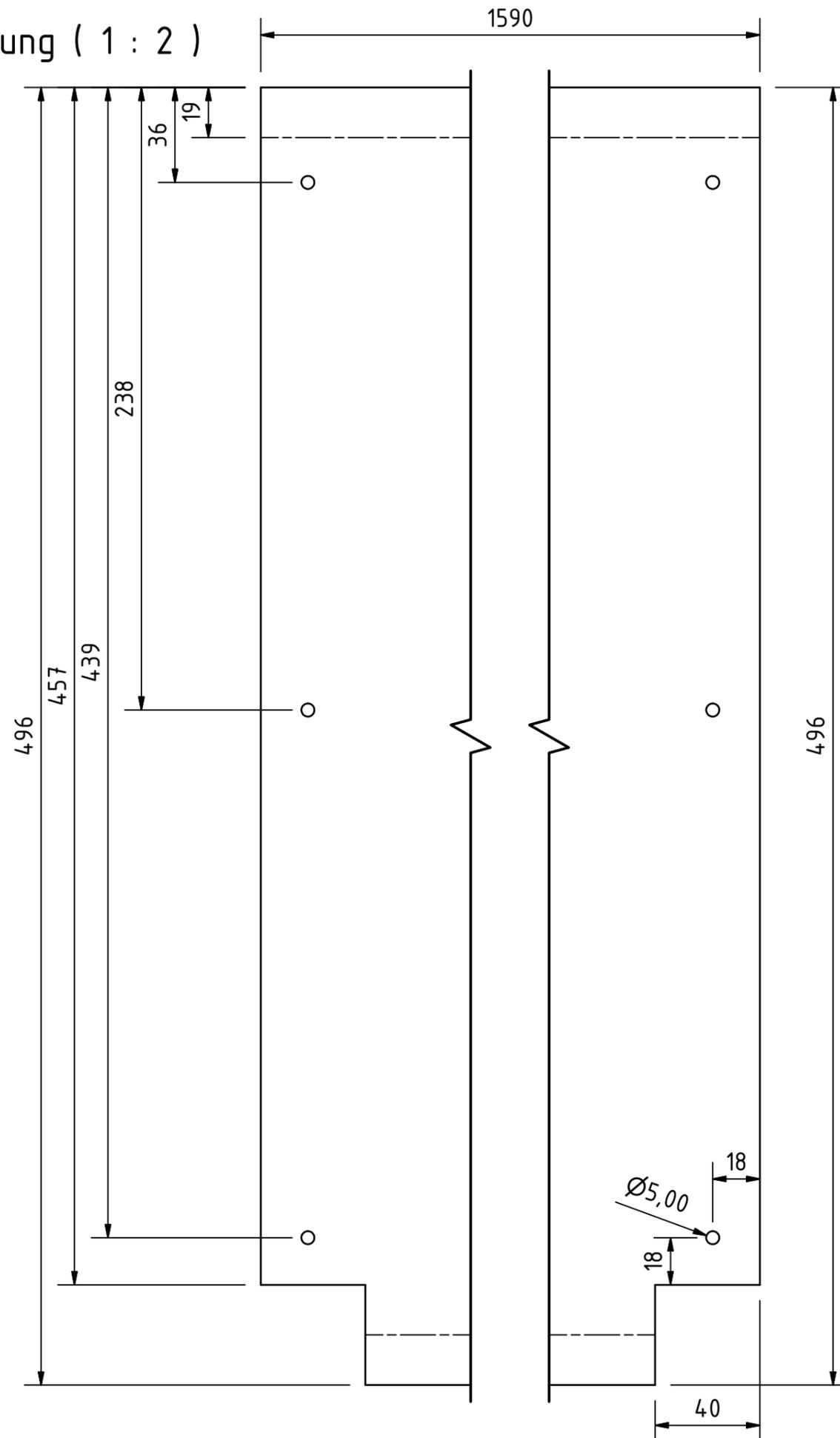
Material
EN AW - 6060 T66
g = 2,7 kg/dm³

Toleranzen nach:
ISO 2768 - m

Status Konstruktionszeichnung	
Isometrische Darstellung	
	
Firma 	Projekt Konzeptionierung eines optimierten Aufständerungssystems für Photovoltaikanlagen auf Flachdächern
Bauteil POS 06 - Modulendklemme POS 07 - Modulmittelklemme	Seite A5
	Format A3
Maßstab 2:1	
Gezeichnet: Matthias Halaburda Matrikelnr.: 1805666 Datum: 06.09.2010	

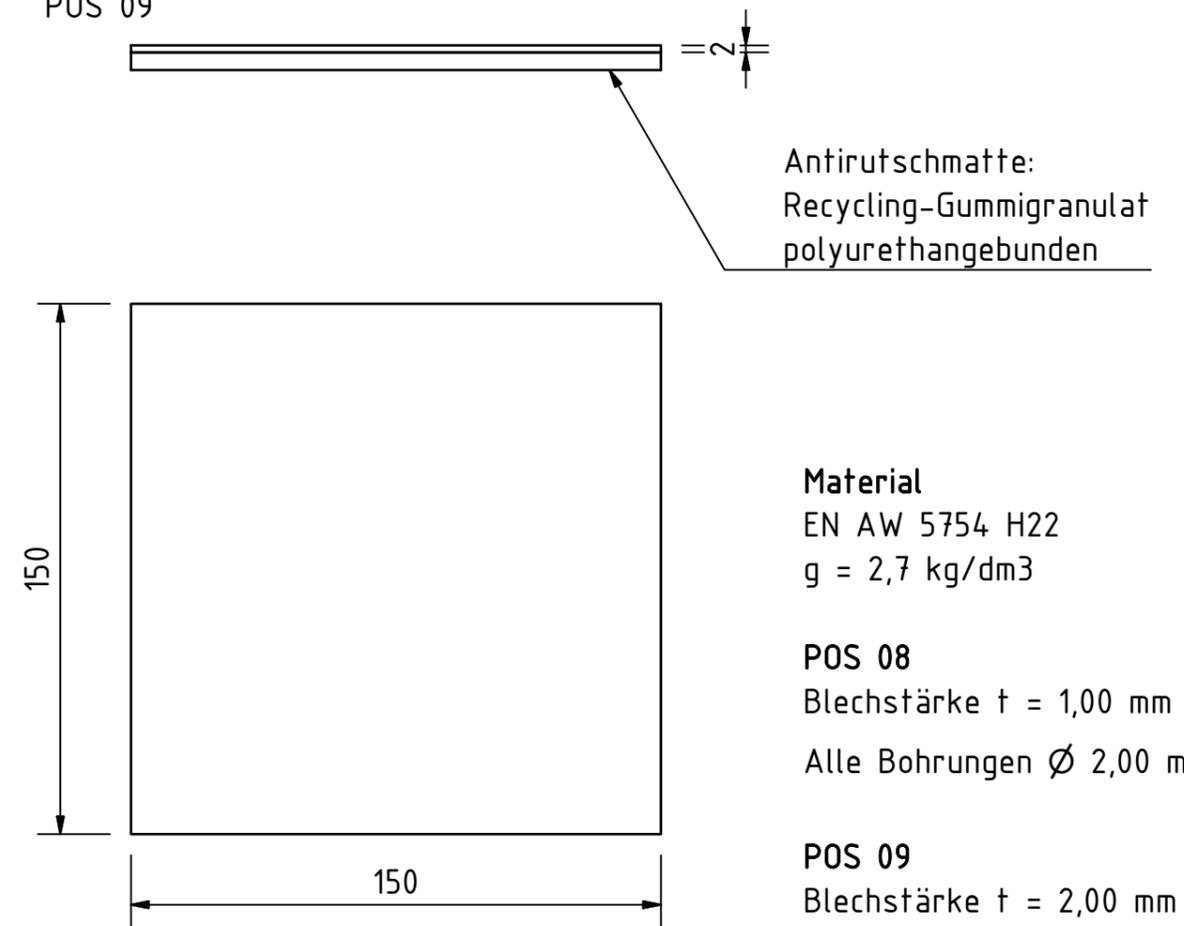
Abwicklung (1 : 2)

POS 08



Abwicklung (1 : 2)

POS 09



Status	Konstruktionszeichnung		
Isometrische Darstellung			
Firma		Projekt Konzeptionierung eines optimierten Aufständersystems für Photovoltaikanlagen auf Flachdächern	
Bauteil	POS 08 - Windleitblech POS 09 - Auflagerplatte		Seite A6
			Format A3
			Maßstab 1:2
Gezeichnet: Matthias Halaburda	Matrikelnr.: 1805666	Datum: 06.09.2010	

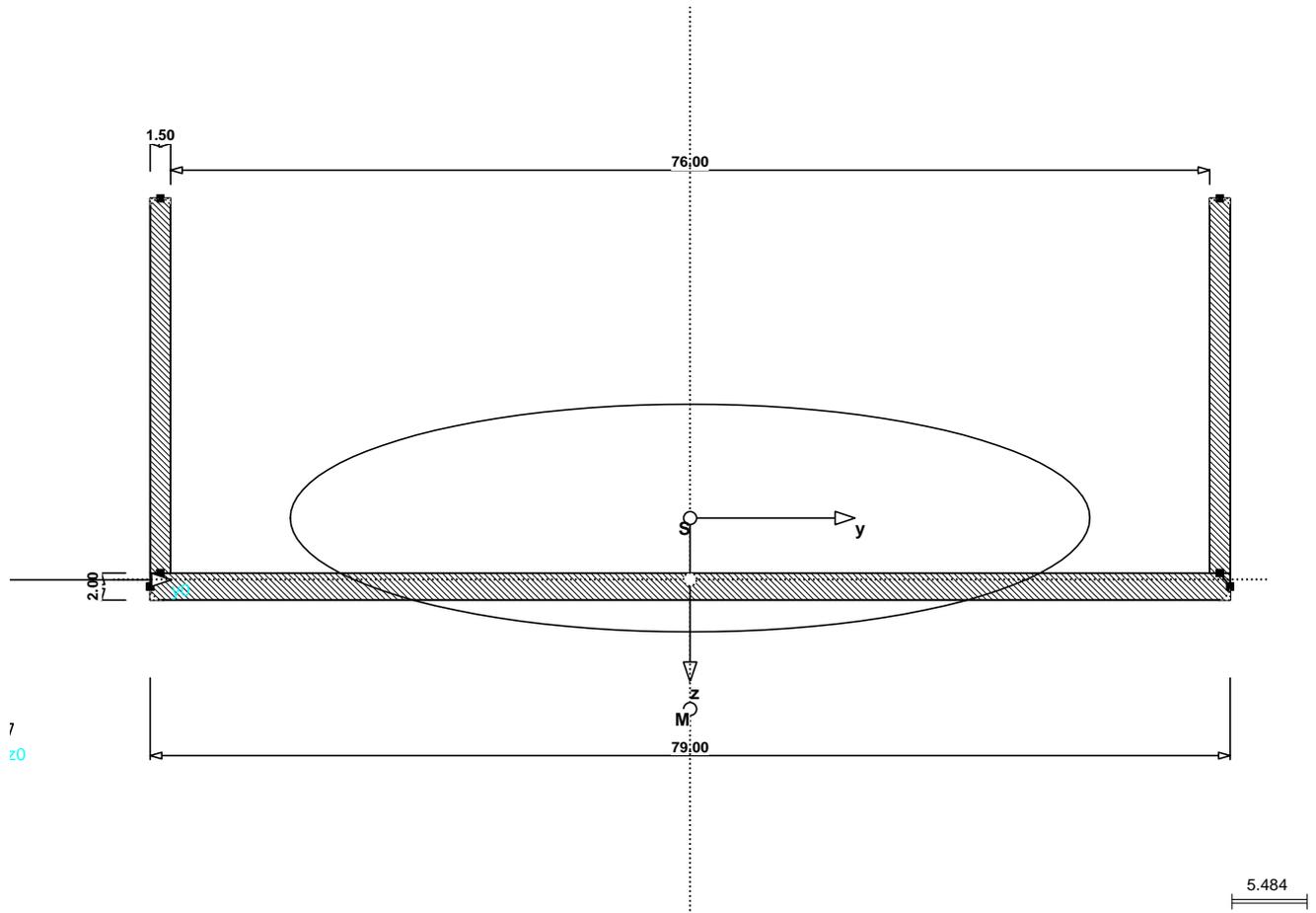
ANHANG B

Materialliste

POS [-]	Bauteibezeichnung [-]	Volumen [cm ³]	Wichte [g/cm ³]	Gewicht [g]
01	Fußprofil	256,6	2,7	777
02	Stützprofil	121,8		330
03	Koppelprofil	323,8		877
04	Modulaufleger oben	40,6		110
05	Modulaufleger unten	47,8		129
06	Modulendklemme	12,2		33
07	Modulmittelklemme	8,9		24
08	Windleitblech	785		2147
09	Auflagerplatte	45		122
Winkelstütze				
01	1 x Fußprofil	256,6	2,7	777
02	1 x Stützprofil	121,8		330
04	1 x Modulaufleger oben	40,6		110
05	1x Modulaufleger unten	47,8		129
06	2 x Modulendklemme	24,4		66
09	2 x Auflagerplatte	90		244
Summe:		581,2		2,7
Gewicht bezogen auf die Modulfläche (d_M= 2,69 m)				
[-]	[-]	[cm ³]	[g/cm ³]	[g/m ²]
	1 x Winkelstütze	524	2,7	1656
	2 x Koppelprofil (l _{KP} = 125m)	647,6		1744
	1 x Windleitblech	785		2147
Summe:		1956,6	2,7	4334
Befestigungsmaterial				
Winkelstütze				
3 x Innensechskantschraube M6 x 90 A2				
2 x Innensechskantschraube M6 x 45 A2 , mit Unterkopfverzahnung				
Koppelprofil				
4 x Selbstbohrende Schraube Ø 5,5 x 16 A2				
Windleitblech				
6 x Selbstbohrende Schraube Ø 5,5 x 16 A2				

ANHANG C

■ POS 01 - FUSSPROFIL



EINGABEDATEN

KNOTEN [mm]					
Nr.	y/R	z/Phi	u	v	
7	11.25	-28.10	-38.75	-23.55	
9	88.75	-28.10	38.75	-23.55	
15	11.25	-0.50	-38.75	4.05	
16	88.75	-0.50	38.75	4.05	
17	10.50	0.50	-39.50	5.05	
18	89.50	0.50	39.50	5.05	

ELEMENTE [mm]						
Nr.	Anf	Ende	t	Mat	Länge	
2	7	15	1.50	1	27.60	
3	9	16	1.50	1	27.60	
7	17	18	2.00	1	79.00	
16	18	16	0.00	1	1.25	
17	17	15	0.00	1	1.25	

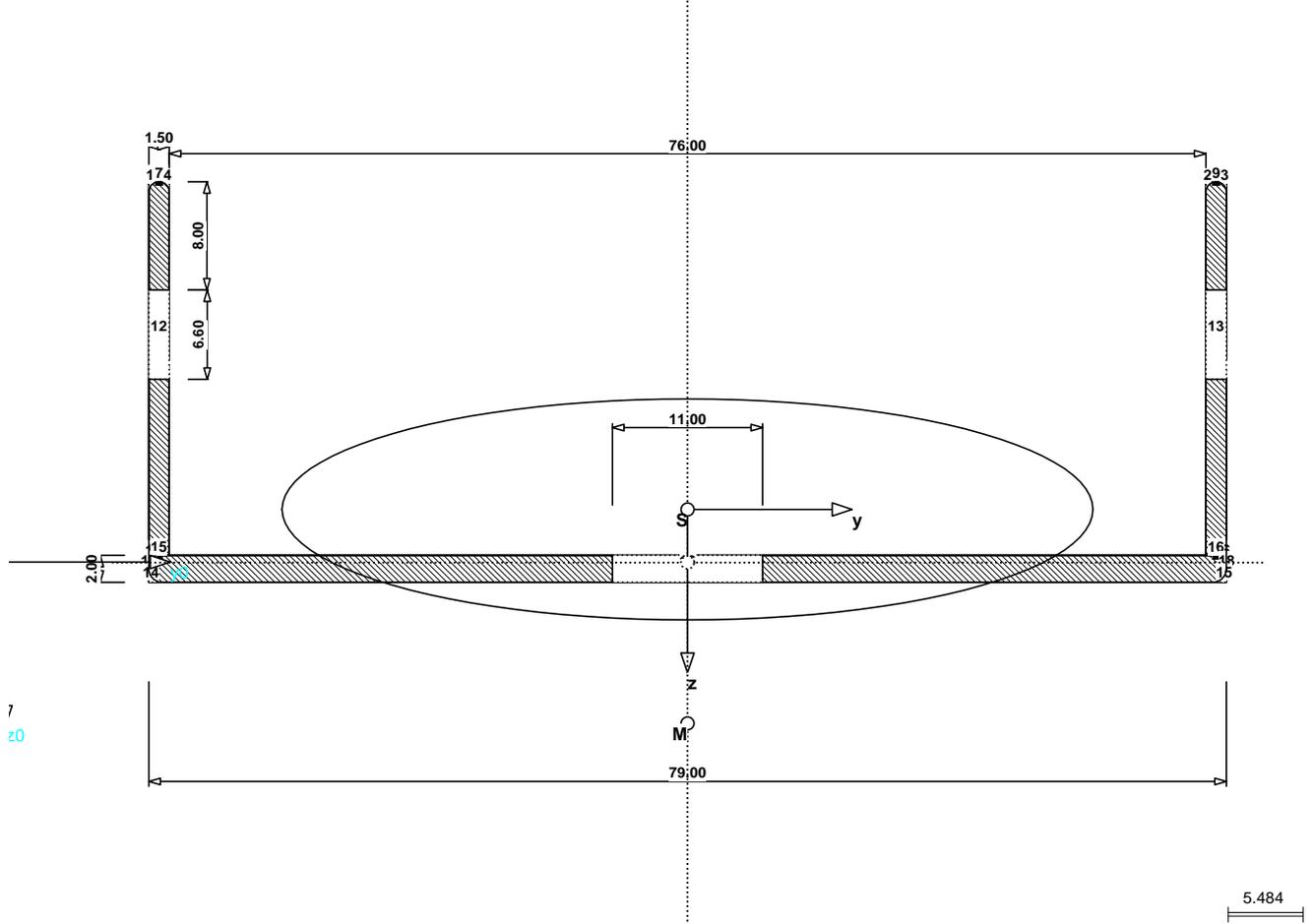
PUNKTELEMENTE							
Nr.	Mat	Typ	Status	Lage y	Lage z	Abmessung	Drehung
1	-	Ausrundung	Aussparen	10.502	0.000	0.750	0.0
2	-	Ausrundung	Aussparen	88.002	0.000	0.750	0.0
3	-	Ausrundung	Aussparen	89.502	0.000	0.750	90.0
4	-	Ausrundung	Aussparen	12.002	0.000	0.750	90.0
14	-	Ausrundung	Aussparen	10.502	0.000	1.000	-90.0
15	-	Ausrundung	Aussparen	89.502	0.000	1.000	-180.0

MATERIALDATEN [N/mm ²] [N/mm ²] [kN/cm ³]					
Nr.	Bezeichnung	E	G	γ	fy,k
1	Aluminium EN AW-6060 (DT) T6	7.00E+04	2.70E+04	2.70E-05	160.00

QUERSCHNITTSKENNWERTE

A	2.40	cm ²	Apl,y	1.58	cm ²
Ay	1.33	cm ²	Apl,z	0.83	cm ²
Az	0.47	cm ²	fy,0	5.00	cm
yS,0	5.00	cm	fz,0	0.00	cm
zS,0	-0.46	cm	Vpl,y,d	13.27	kN
ly	1.69	cm ⁴	Vpl,z,d	6.95	kN
lz	20.52	cm ⁴	Npl,d	34.89	kN
α	0.0	°			
Ip	22.21	cm ⁴			
Ip,M	26.98	cm ⁴			
Iy	0.84	cm			
iz	2.92	cm			
ip	3.04	cm			
ip,M	3.35	cm			
i ₀ ,M	0.83	cm			
G	0.65	kg/m			
U	27.03	cm			
It	0.03	cm ⁴			
It,s	9.33	cm ⁴			
yM,0	5.00	cm			
zM,0	0.95	cm			
yM,0	0.00	cm			
zM,0	1.41	cm			
I ₀ ,S	59.30	cm ⁶			
I ₀ ,M	18.76	cm ⁶			
r ₀ ,M	0.00				
Wy,max	2.80	cm ³			
Wy,min	-0.72	cm ³			
Wz,max	5.19	cm ³			
Wz,min	-5.19	cm ³			
W ₀ ,M,max	2.47	cm ⁴			
W ₀ ,M,min	-2.47	cm ⁴			
Wt	0.14	cm ³			
ry	-5.94	cm			
rM,z	-8.76	cm			
λM	0.023566	1/cm			
Mpl,y,d	0.18	kNm			
Mpl,z,d	0.92	kNm			
Wpl,y	1.27	cm ³			
Wpl,z	6.29	cm ³			

■ POS 02 - FUSSPROFIL NETTOQUERSCHNITT



EINGABEDATEN

KNOTEN [mm]						ELEMENTE [mm]					
Nr.	y/R	z/Phi	u	v		Nr.	Anf	Ende	t	Mat	Länge
7	11.25	-28.10	-38.75	-24.21		2	7 - 15	1.50	1		27.60
9	88.75	-28.10	38.75	-24.21		3	9 - 16	1.50	1		27.60
15	11.25	-0.50	-38.75	3.39		7	17 - 18	2.00	1		79.00
16	88.75	-0.50	38.75	3.39		16	18 - 16	0.00	1		1.25
17	10.50	0.50	-39.50	4.39		17	17 - 15	0.00	1		1.25
18	89.50	0.50	39.50	4.39							

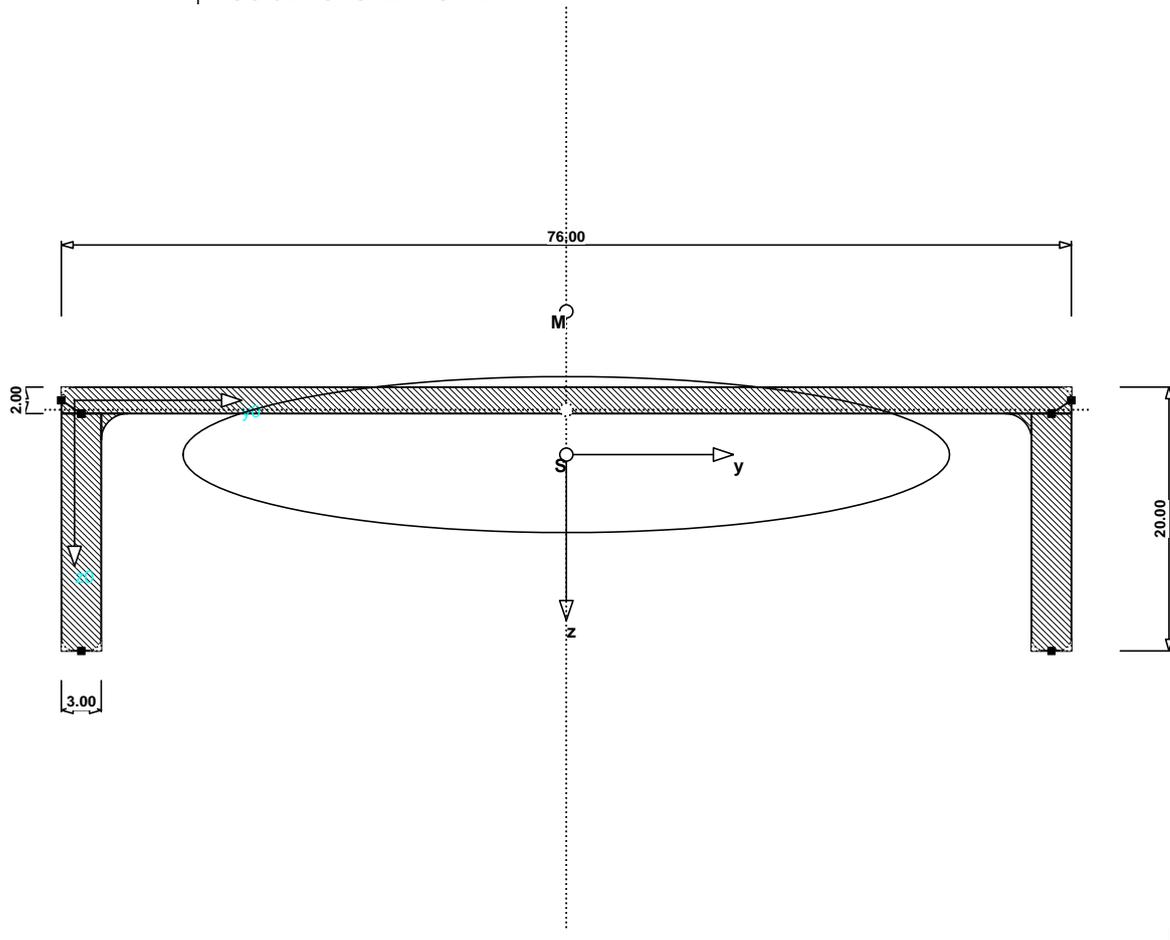
PUNKTELEMENTE							
Nr.	Mat	Typ	Status	Lage y	Lage z	Abmessung	Drehung
1	-	Ausrundung	Aussparen	10.502	0.000	0.750	0.0
2	-	Ausrundung	Aussparen	88.002	0.000	0.750	0.0
3	-	Ausrundung	Aussparen	89.502	0.000	0.750	90.0
4	-	Ausrundung	Aussparen	12.002	0.000	0.750	90.0
12	-	Rechteck	Aussparen	11.252	0.000	1.500/6.600	0.0
13	-	Rechteck	Aussparen	88.752	0.000	1.500/6.600	0.0
14	-	Ausrundung	Aussparen	10.502	0.000	1.000	-90.0
15	-	Ausrundung	Aussparen	89.502	0.000	1.000	-180.0
16	-	Rechteck	Aussparen	50.002	0.000	11.000/2.000	-180.0

MATERIALDATEN [N/mm ²] [N/mm ²] [kN/cm ³]					
Nr.	Bezeichnung	E	G	γ _k	f _{y,k}
1	Aluminium EN AW-6060 (DT) T6	7.00E+04	2.70E+04	2.70E-05	160.00

QUERSCHNITTSKENNWERTE

A	1.98 cm ²	Apl,y	1.58 cm ²
Ay	1.39 cm ²	Apl,z	0.83 cm ²
Az	0.55 cm ²	f _{y,0}	5.00 cm
yS,0	5.00 cm	f _{z,0}	0.00 cm
zS,0	-0.39 cm	V _{pl,y,d}	13.27 kN
ly	1.32 cm ⁴	V _{pl,z,d}	6.95 kN
lz	17.52 cm ⁴	N _{pl,d}	28.81 kN
α	0.0 °		
Ip	18.85 cm ⁴		
Ip,M	24.25 cm ⁴		
iy	0.82 cm		
iz	2.97 cm		
ip	3.08 cm		
ip,M	3.50 cm		
i _{0,M}	0.91 cm		
G	0.53 kg/m		
U	23.19 cm		
It	0.03 cm ⁴		
It,s	8.92 cm ⁴		
yM,0	5.00 cm		
zM,0	1.19 cm		
yM,0	0.00 cm		
zM,0	1.58 cm		
I _{0,S}	59.92 cm ⁶		
I _{0,M}	20.05 cm ⁶		
r _{0,M}	0.00		
Wy,max	2.46 cm ³		
Wy,min	-0.55 cm ³		
Wz,max	4.44 cm ³		
Wz,min	-4.44 cm ³		
W _{0,M,max}	3.01 cm ⁴		
W _{0,M,min}	-3.01 cm ⁴		
Wt	0.14 cm ³		
ry	-8.89 cm		
rM,z	-12.19 cm		
λ _M	0.022795 1/cm		
M _{pl,y,d}	0.13 kNm		
M _{pl,z,d}	0.79 kNm		
W _{pl,y}	0.92 cm ³		
W _{pl,z}	5.46 cm ³		

■ POS 02 - STÜTZPROFIL



EINGABEDATEN

KNOTEN [mm]					ELEMENTE [mm]					
Nr.	y/R	z/Phi	u	v	Nr.	Anf	Ende	t	Mat	Länge
1	-1.00	0.00	-38.00	-4.12	1	1 - 2	2.00	2	2	76.00
2	75.00	0.00	38.00	-4.12	2	8 - 3	3.00	2	2	18.00
3	0.50	19.00	-36.50	14.88	3	7 - 4	3.00	2	2	18.00
4	73.50	19.00	36.50	14.88	6	7 - 2	0.00	2	2	1.80
7	73.50	1.00	36.50	-3.12	7	8 - 1	0.00	2	2	1.80
8	0.50	1.00	-36.50	-3.12						

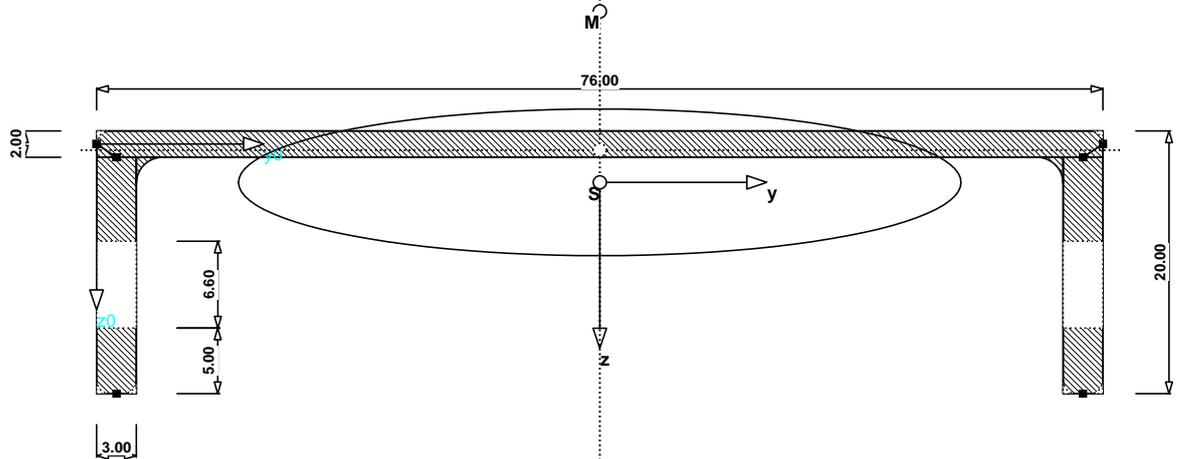
PUNKTELEMENTE							
Nr.	Mat	Typ	Status	Lage y	Lage z	Abmessung	Drehung
1	2	Ausrundung	Hinzufügen	2.000	0.000	2.000	0.0
2	2	Ausrundung	Hinzufügen	72.000	0.000	2.000	90.0
3	-	Ausrundung	Aussparen	75.000	0.000	1.000	90.0
4	-	Ausrundung	Aussparen	-1.000	0.000	1.000	0.0
5	-	Ausrundung	Aussparen	-1.000	0.000	1.000	-90.0
6	-	Ausrundung	Aussparen	72.000	0.000	1.000	-90.0
7	-	Ausrundung	Aussparen	75.000	0.000	1.000	-180.0
8	-	Ausrundung	Aussparen	2.000	0.000	1.000	-180.0

MATERIALDATEN [N/mm ²] [N/mm ²] [kN/cm ³]		E	G	γ	fy,k
Nr.	Bezeichnung				
2	Aluminium EN AW-6060 (DT) T6	7.00E+04	2.70E+04	2.70E-05	160.00

QUERSCHNITTSKENNWERTE

A	2.59 cm ²	Apl,y	1.52 cm ²
Ay	1.30 cm ²	Apl,z	1.08 cm ²
Az	0.38 cm ²	fy,0	3.70 cm
yS,0	3.70 cm	fz,0	0.07 cm
zS,0	0.41 cm	Vpl,y,d	12.76 kN
Iy	0.91 cm ⁴	Vpl,z,d	9.07 kN
Iz	21.54 cm ⁴	Npl,d	37.88 kN
α	0.0 °		
Ip	22.45 cm ⁴		
Ip,M	25.52 cm ⁴		
Iy	0.59 cm		
iz	2.89 cm		
ip	2.95 cm		
ip,M	3.14 cm		
i ₀ ,M	0.59 cm		
G	0.70 kg/m		
U	22.37 cm		
It	0.05 cm ⁴		
It,s	8.35 cm ⁴		
yM,0	3.70 cm		
zM,0	-0.67 cm		
yM,0	0.00 cm		
zM,0	-1.09 cm		
I ₀ ,S	34.14 cm ⁶		
I ₀ ,M	8.78 cm ⁶		
r ₀ ,M	0.00		
Wy,max	0.61 cm ³		
Wy,min	-1.78 cm ³		
Wz,max	5.67 cm ³		
Wz,min	-5.67 cm ³		
W ₀ ,M,max	1.95 cm ⁴		
W ₀ ,M,min	-1.95 cm ⁴		
Wt	0.17 cm ³		
ry	6.69 cm		
rM,z	8.87 cm		
λM	0.046826 1/cm		
Mpl,y,d	0.16 kNm		
Mpl,z,d	1.00 kNm		
Wpl,y	1.10 cm ³		
Wpl,z	6.84 cm ³		

POS 02 - STÜTZPROFIL NETTOQUERSCHNITT



5.741

EINGABEDATEN

KNOTEN [mm]					ELEMENTE [mm]					
Nr.	y/R	z/Phi	u	v	Nr.	Anf	Ende	t	Mat	Länge
1	0.00	0.00	-38.00	-2.91	1	1 -	2	2.00	1	76.00
2	76.00	0.00	38.00	-2.91	2	6 -	3	3.00	1	18.00
3	1.50	19.00	-36.50	16.09	3	5 -	4	3.00	1	18.00
4	74.50	19.00	36.50	16.09	4	5 -	2	0.00	1	1.80
5	74.50	1.00	36.50	-1.91	5	6 -	1	0.00	1	1.80
6	1.50	1.00	-36.50	-1.91						

PUNKTELEMENTE						
Nr.	Mat	Typ	Status	Lage y	Lage z	AbmessungerDrehung
3	-	Ausrundung	Aussparen	76.000	0.000	1.000 90.0
4	-	Ausrundung	Aussparen	0.000	0.000	1.000 0.0
5	-	Ausrundung	Aussparen	0.000	0.000	1.000 -90.0
6	-	Ausrundung	Aussparen	73.000	0.000	1.000 -90.0
7	-	Ausrundung	Aussparen	76.000	0.000	1.000 -180.0
8	-	Ausrundung	Aussparen	3.000	0.000	1.000 -180.0
9	-	Rechteck	Aussparen	1.500	0.000	3.000/6.600 0.0
10	-	Rechteck	Aussparen	74.500	0.000	3.000/6.600 0.0
11	1	Ausrundung	Hinzufügen	3.000	0.000	2.000 0.0
12	1	Ausrundung	Hinzufügen	73.000	0.000	2.000 90.0

MATERIALDATEN [N/mm ²] [N/mm ²] [kN/cm ³]				
Nr.	Bezeichnung	E	G	γ _f k
1	Aluminium EN AW-6060 (DT) T6	7.00E+04	2.70E+04	2.70E-05
				160.00

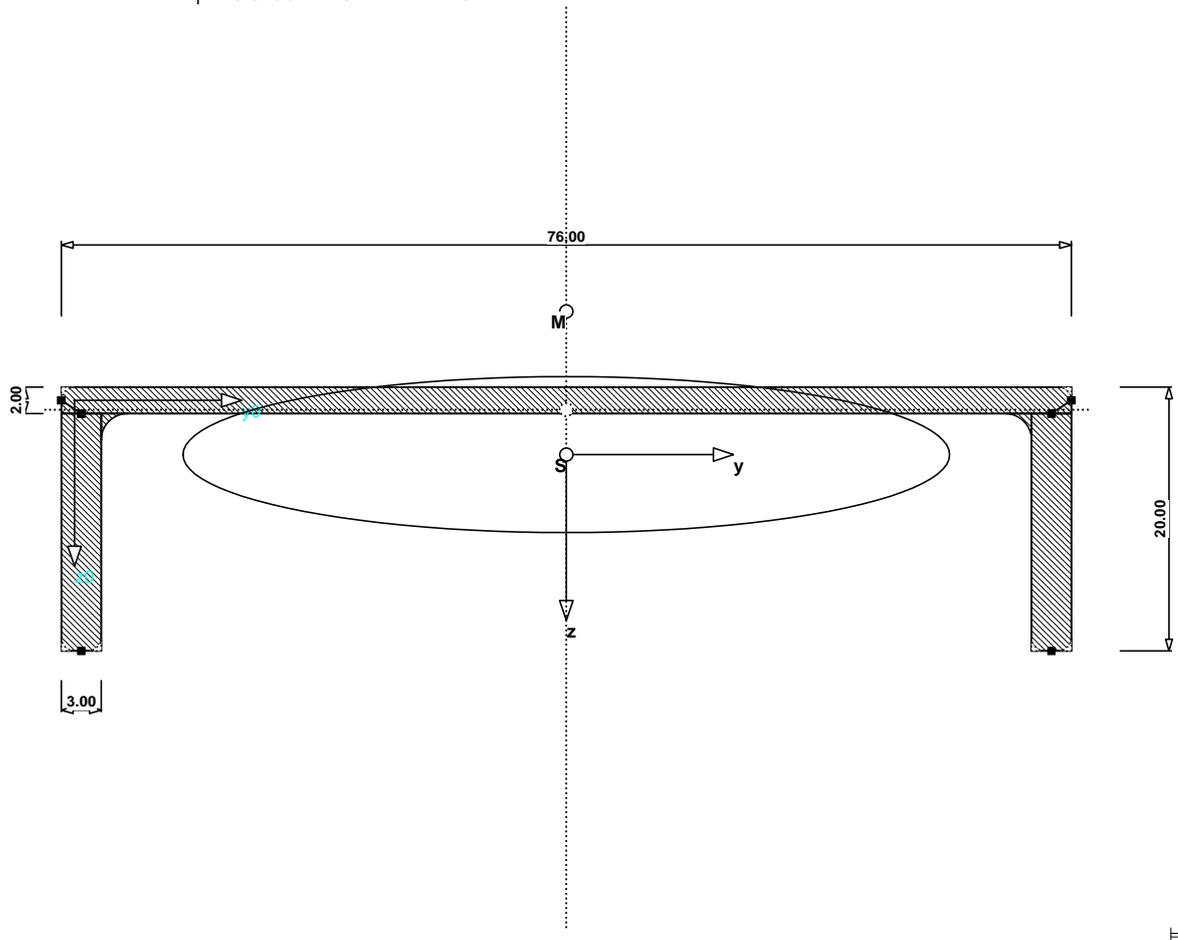
GRENZSPANNUNGEN [N/mm ²]				
Nr.	Bezeichnung	grenz σ _x	grenz τ	grenz σ _v
1	Aluminium EN AW-6060 (DT) T6	145.45	83.98	145.45

SCHNITTGRÖSSEN [kN] [kNm] [kNm ²]									
Nr.	x	N	V _u	V _v	M _{xp}	M _{xs}	M _u	M _v	M ₀
		LF 2: Aus RSTAB 7, WS_15°II, Stab 3, LG2 G + S + W.re							
1	0.00	-2.22	0.00	0.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	155.78	-2.46	0.00	0.24	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00
3	233.67	-2.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00
4	311.56	-2.69	0.00	-0.23	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00
5	427.00	-2.87	0.00	-0.58	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
6	467.00	-2.94	0.00	-0.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	467.34	-2.94	0.00	-0.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

QUERSCHNITTSKENNWERTE

A	2.21	cm ²	Apl,y	1.52	cm ²
Ay	1.35	cm ²	Apl,z	1.08	cm ²
Az	0.43	cm ²	f _{y,0}	3.80	cm
yS,0	3.80	cm	f _{z,0}	0.05	cm
zS,0	0.29	cm	Vpl,y,d	12.76	kN
ly	0.69	cm ⁴	Vpl,z,d	9.07	kN
lz	16.46	cm ⁴	Npl,d	32.12	kN
α	0.0	°			
Ip	17.15	cm ⁴			
Ip,M	21.64	cm ⁴			
iy	0.56	cm			
iz	2.73	cm			
ip	2.79	cm			
ip,M	3.13	cm			
i ₀ ,M	0.72	cm			
G	0.60	kg/m			
U	20.93	cm			
It	0.05	cm ⁴			
It,s	2.85	cm ⁴			
yM,0	3.80	cm			
zM,0	-1.01	cm			
yM,0	0.00	cm			
zM,0	-1.30	cm			
I ₀ ,S	34.34	cm ⁶			
I ₀ ,M	11.35	cm ⁶			
r ₀ ,M	0.00	cm			
Wy,max	0.43	cm ³			
Wy,min	-1.77	cm ³			
Wz,max	4.33	cm ³			
Wz,min	-4.33	cm ³			
W ₀ ,M,max	2.96	cm ⁴			
W ₀ ,M,min	-2.96	cm ⁴			
Wt	0.17	cm ³			
ry	13.03	cm			
rM,z	15.88	cm			
λ _M	0.041181	1/cm			
Mpl,y,d	0.10	kNm			
Mpl,z,d	0.78	kNm			
Wpl,y	0.70	cm ³			
Wpl,z	5.40	cm ³			

■ POS 03 - KOPPELPROFIL



EINGABEDATEN

KNOTEN [mm]					ELEMENTE [mm]					
Nr.	y/R	z/Phi	u	v	Nr.	Anf	Ende	t	Mat	Länge
1	-1.00	0.00	-38.00	-4.12	1	1 - 2	2.00	2	2	76.00
2	75.00	0.00	38.00	-4.12	2	8 - 3	3.00	2	2	18.00
3	0.50	19.00	-36.50	14.88	3	7 - 4	3.00	2	2	18.00
4	73.50	19.00	36.50	14.88	6	7 - 2	0.00	2	2	1.80
7	73.50	1.00	36.50	-3.12	7	8 - 1	0.00	2	2	1.80
8	0.50	1.00	-36.50	-3.12						

PUNKTELEMENTE							
Nr.	Mat	Typ	Status	Lage y	Lage z	Abmessung	Drehung
1	2	Ausrundung	Hinzufügen	2.000	0.000	2.000	0.0
2	2	Ausrundung	Hinzufügen	72.000	0.000	2.000	90.0
3	-	Ausrundung	Aussparen	75.000	0.000	1.000	90.0
4	-	Ausrundung	Aussparen	-1.000	0.000	1.000	0.0
5	-	Ausrundung	Aussparen	-1.000	0.000	1.000	-90.0
6	-	Ausrundung	Aussparen	72.000	0.000	1.000	-90.0
7	-	Ausrundung	Aussparen	75.000	0.000	1.000	-180.0
8	-	Ausrundung	Aussparen	2.000	0.000	1.000	-180.0

MATERIALDATEN [N/mm ²] [N/mm ²] [kN/cm ³]		E	G	γ	fy,k
Nr.	Bezeichnung				
2	Aluminium EN AW-6060 (DT) T6	7.00E+04	2.70E+04	2.70E-05	160.00

QUERSCHNITTSKENNWERTE

A	2.59 cm ²	Apl,y	1.52 cm ²
Ay	1.30 cm ²	Apl,z	1.08 cm ²
Az	0.38 cm ²	fy,0	3.70 cm
yS,0	3.70 cm	fz,0	0.07 cm
zS,0	0.41 cm	Vpl,y,d	12.76 kN
ly	0.91 cm ⁴	Vpl,z,d	9.07 kN
lz	21.54 cm ⁴	Npl,d	37.88 kN
α	0.0 °		
Ip	22.45 cm ⁴		
Ip,M	25.52 cm ⁴		
iy	0.59 cm		
iz	2.89 cm		
ip	2.95 cm		
ip,M	3.14 cm		
i0,M	0.59 cm		
G	0.70 kg/m		
U	22.37 cm		
It	0.05 cm ⁴		
It,s	8.35 cm ⁴		
yM,0	3.70 cm		
zM,0	-0.67 cm		
yM,0	0.00 cm		
zM,0	-1.09 cm		
I0,S	34.14 cm ⁶		
I0,M	8.78 cm ⁶		
r0,M	0.00		
Wy,max	0.61 cm ³		
Wy,min	-1.78 cm ³		
Wz,max	5.67 cm ³		
Wz,min	-5.67 cm ³		
W0,M,max	1.95 cm ⁴		
W0,M,min	-1.95 cm ⁴		
Wt	0.17 cm ³		
ry	6.69 cm		
rM,z	8.87 cm		
λM	0.046826 1/cm		
Mpl,y,d	0.16 kNm		
Mpl,z,d	1.00 kNm		
Wpl,y	1.10 cm ³		
Wpl,z	6.84 cm ³		

ANHANG D

■ **BASISANGABEN**

BERECHNUNGSART

- | | |
|--|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Statik | <input checked="" type="checkbox"/> Theorie I. Ordnung (lineare Berechnung) |
| <input type="checkbox"/> Nachweis | <input type="checkbox"/> Theorie II. Ordnung (nichtlinear nach Timoshenko) |
| <input type="checkbox"/> Dynamik | <input type="checkbox"/> Theorie großer Verschiebungen (nichtlinear nach Newton-Raphson) |
| | <input type="checkbox"/> Durchschlagproblem (nichtlinear nach Newton-Raphson) |
| <input checked="" type="checkbox"/> Lastfälle | <input type="checkbox"/> Bemessungsfälle |
| <input checked="" type="checkbox"/> LF-Gruppen | <input type="checkbox"/> Dynamikfälle |
| <input type="checkbox"/> LF-Kombinationen | <input type="checkbox"/> Knickfiguren |

STRUKTURKENNWERTE

- | | | |
|---|------------------|--------------------|
| <input type="checkbox"/> 1D-Durchlaufträger | 3 Knoten | 3 Stäbe |
| <input checked="" type="checkbox"/> 2D-Stabwerk | 1 Materialien | 0 Seilstäbe |
| <input type="checkbox"/> 3D-Stabwerk | 3 Querschnitte | 0 Voutenstäbe |
| <input type="checkbox"/> Trägerrost | 1 Stabendgelenke | 0 El. gebet. Stäbe |
| | 0 Stabteilungen | 0 Stabzüge |

■ **KNOTEN**

Knoten Nr.	Bezugs-Knoten	Koordinaten System	Knotenkoordinaten		Kommentar
			X [m]	Z [m]	
1	-	Kartesisch	0.000	0.000	
2	-	Kartesisch	1.198	0.000	
3	-	Kartesisch	0.780	0.209	

■ **MATERIALIEN**

Material Nr.	Material-Bezeichnung	Elast.-Modul E [kN/cm ²]	Schubmodul G [kN/cm ²]	Sp. Gewicht γ [kN/m ³]	Wärmedehnz. α [1/°C]	Beiwert γ_M [-]
1	Aluminium EN AW-6060 (DT) T6 ENV 1999-1-1: 1998	7000.00	2700.00	27.00	2.3000E-05	1.100

■ **QUERSCHNITTE**

Quers. Nr.	Querschnitts-Bezeichnung	Mater. Nr.	I _T [cm ⁴] A [cm ²]	I _y [cm ⁴] A _y [cm ²]	I _z [cm ⁴] A _z [cm ²]
1	DUENQ POS 02	1	2.59	0.91	0.38
2	DUENQ POS 01	1	2.40	1.69	0.47
3	RRO 50x30x2.6	1	3.83	12.30	2.24

■ **STABENDGELENKE**

Gelenk Nr.	Bezugs-system	Gelenk / Feder [kN/m], [kNm/rad]		
		N	V _z	M _y
1	Lokal x,y,z	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

■ **STÄBE**

Stab Nr.	Stabtyp	Knoten		Drehung Typ	Drehung β [°]	Querschnitt		Gelenk		Exz. Nr.	Teil. Nr.	Länge L [m]	
		Anfang	Ende			Anfang	Ende	Anfang	Ende				
1	Balkenstab	1	2	Winkel	0	2	2	-	-	-	-	1.198	X
2	Balkenstab	1	3	Winkel	0	3	3	1	1	-	-	0.808	XZ
3	Balkenstab	3	2	Winkel	0	1	1	-	1	-	-	0.467	XZ

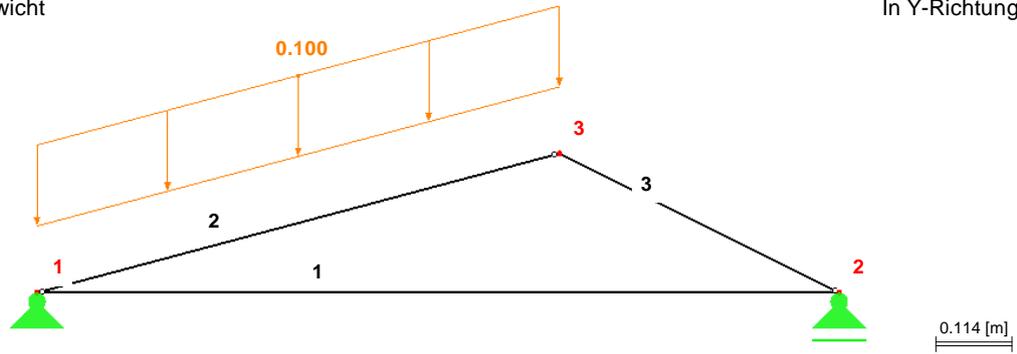
■ **KNOTENLAGER**

Lager Nr.	Knoten Nr.	Lagerdrehung [°] um Y	Lagerung bzw. Feder [kN/m] [kNm/rad]		
			u _x	u _z	ϕ_y
1	1	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	2	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

■ **BELASTUNG - EIGENGEWICHT, +Y**

LF1: Eigengewicht

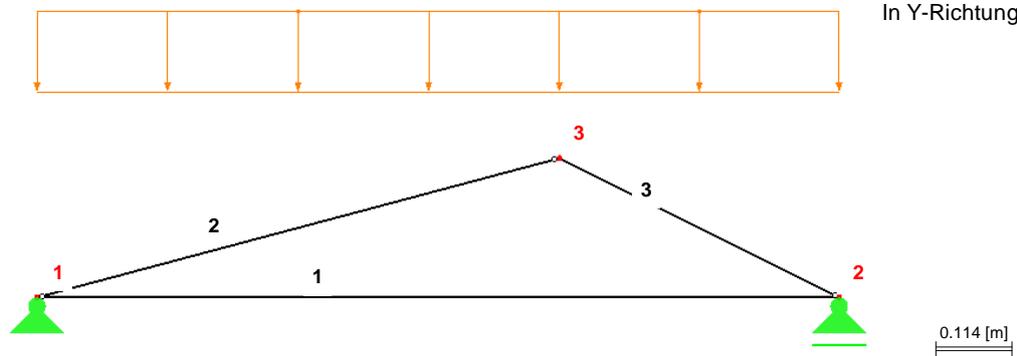
In Y-Richtung



■ **BELASTUNG - SCHNEE, +Y**

LF2: Schnee

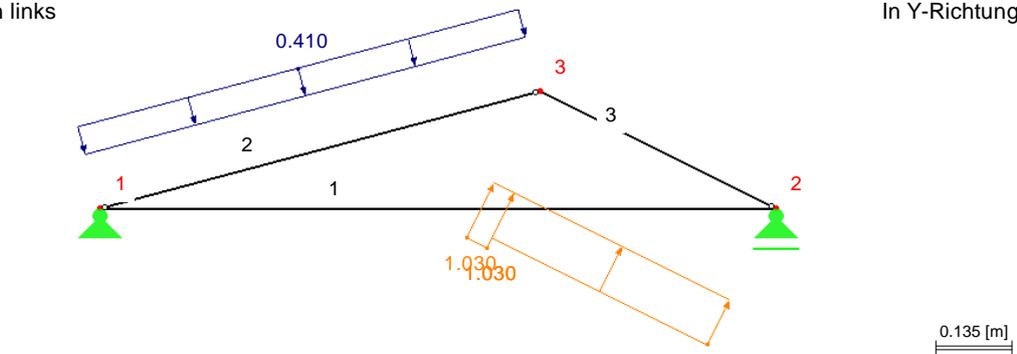
In Y-Richtung



■ **BELASTUNG - WIND VON LINKS, +Y**

LF3: Wind von links

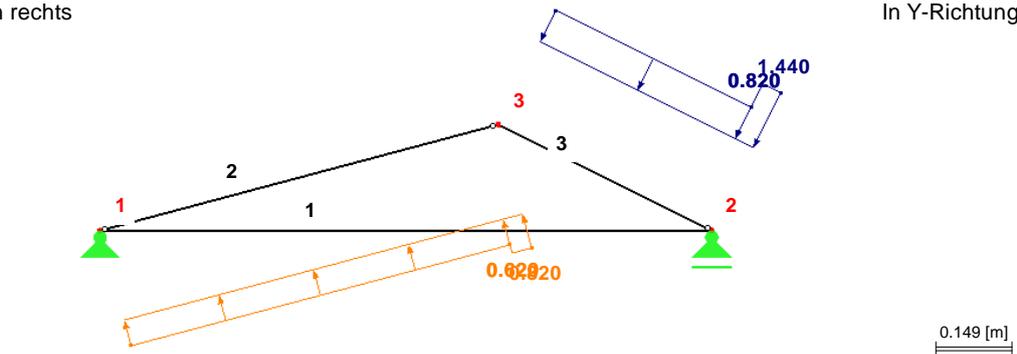
In Y-Richtung



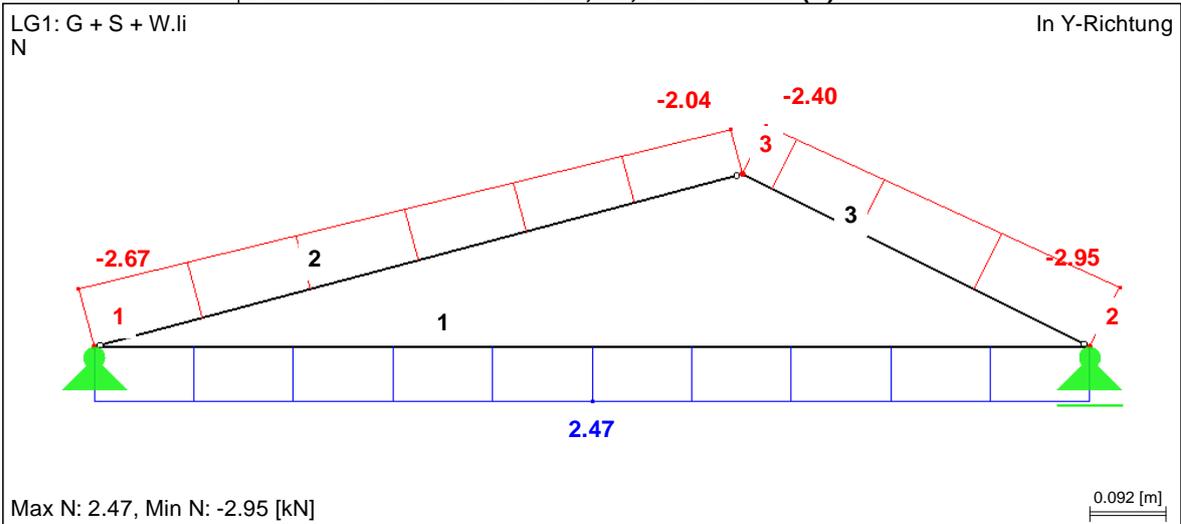
■ **BELASTUNG - WIND VON RECHTS, +Y**

LF4: Wind von rechts

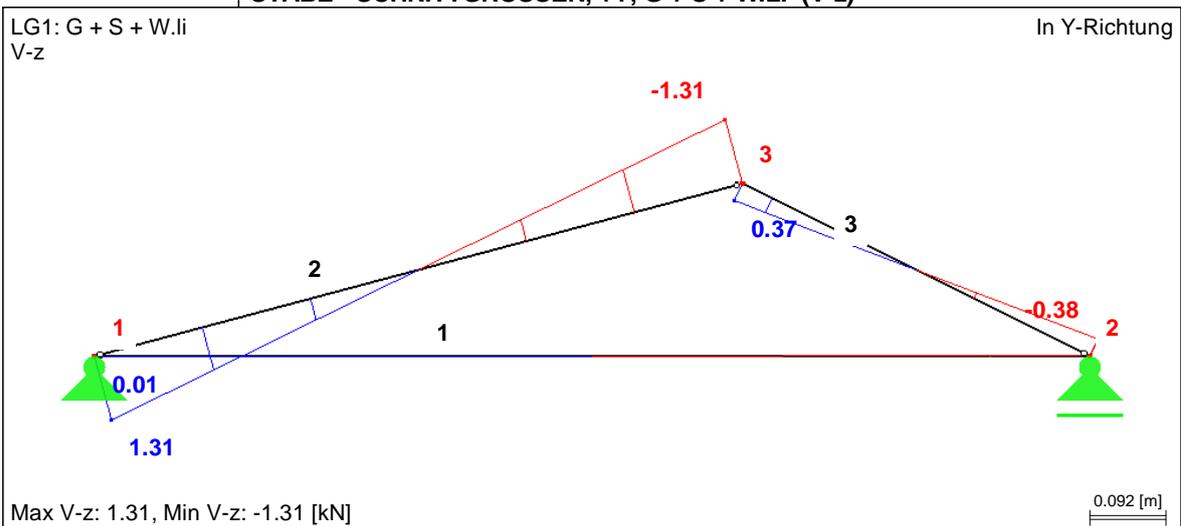
In Y-Richtung



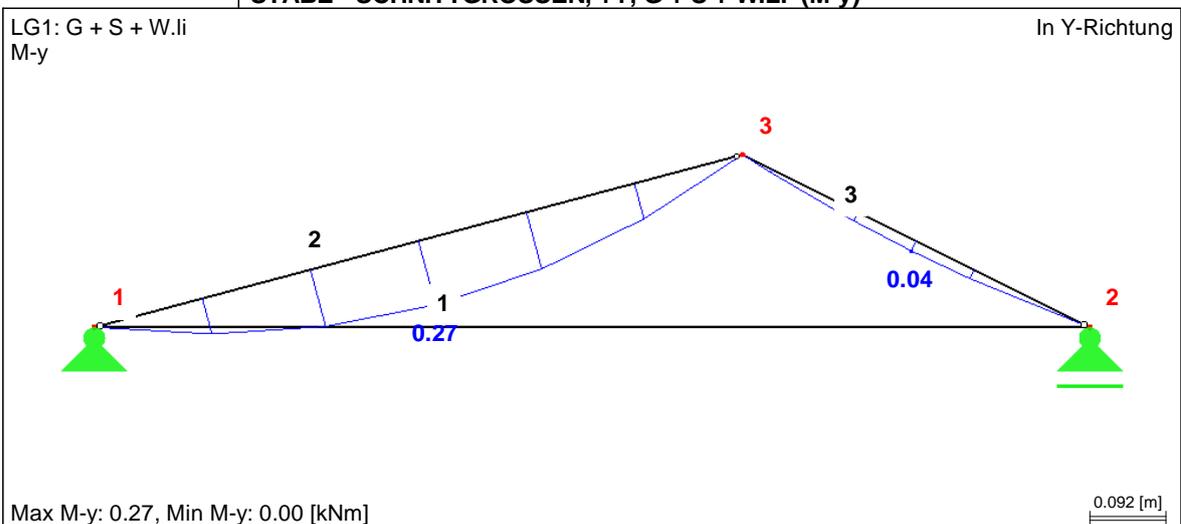
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, +Y, G + S + W.LI (N)**



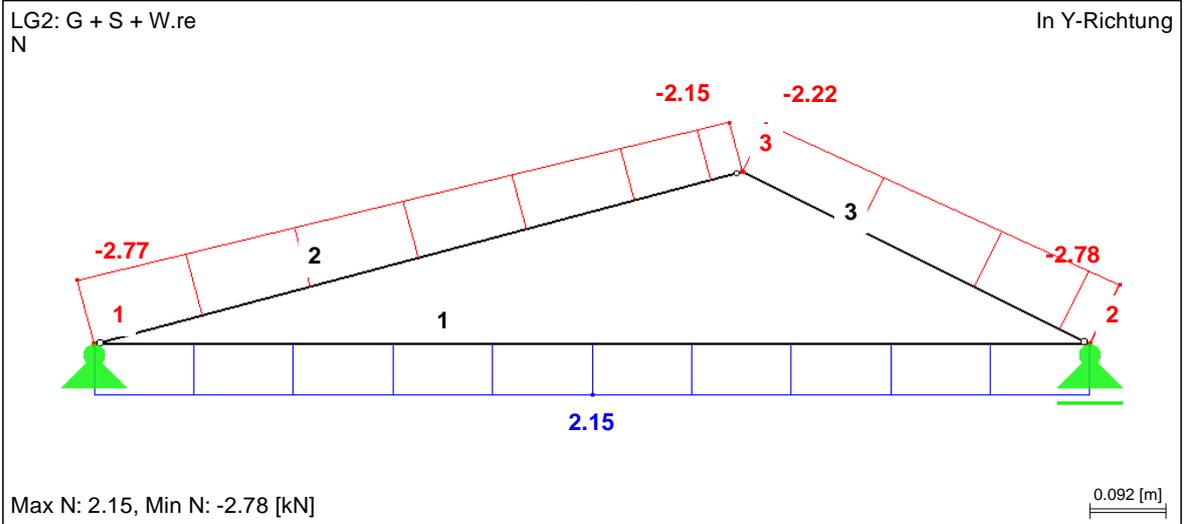
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, +Y, G + S + W.LI (V-z)**



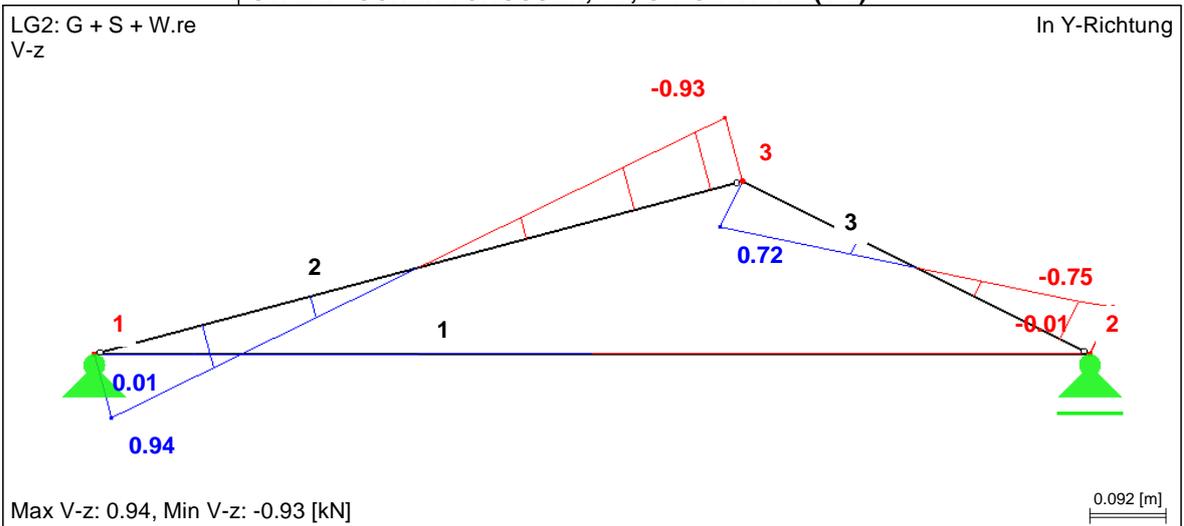
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, +Y, G + S + W.LI (M-y)**



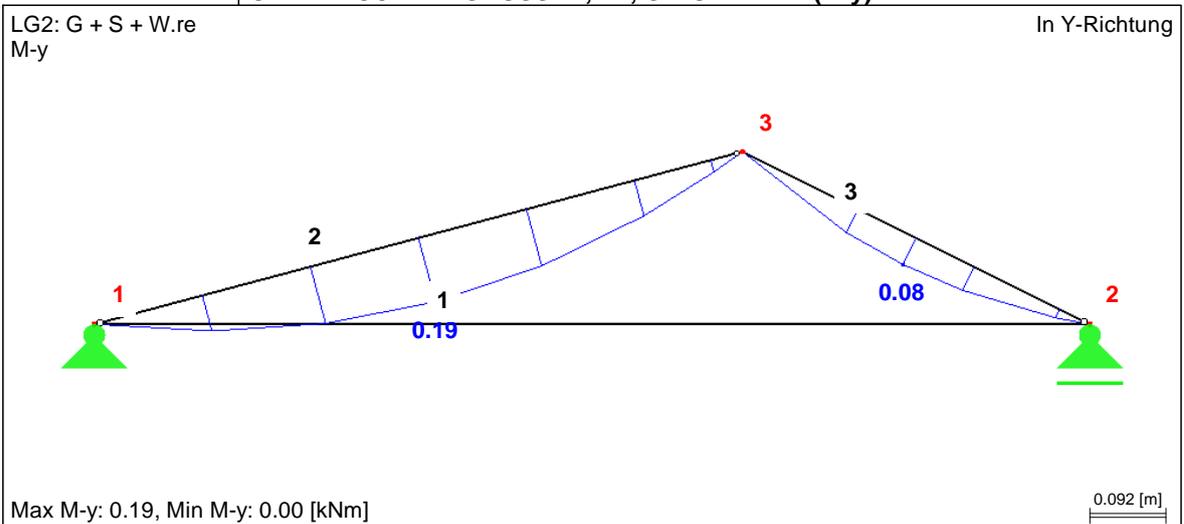
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, +Y, G + S + W.RE (N)**



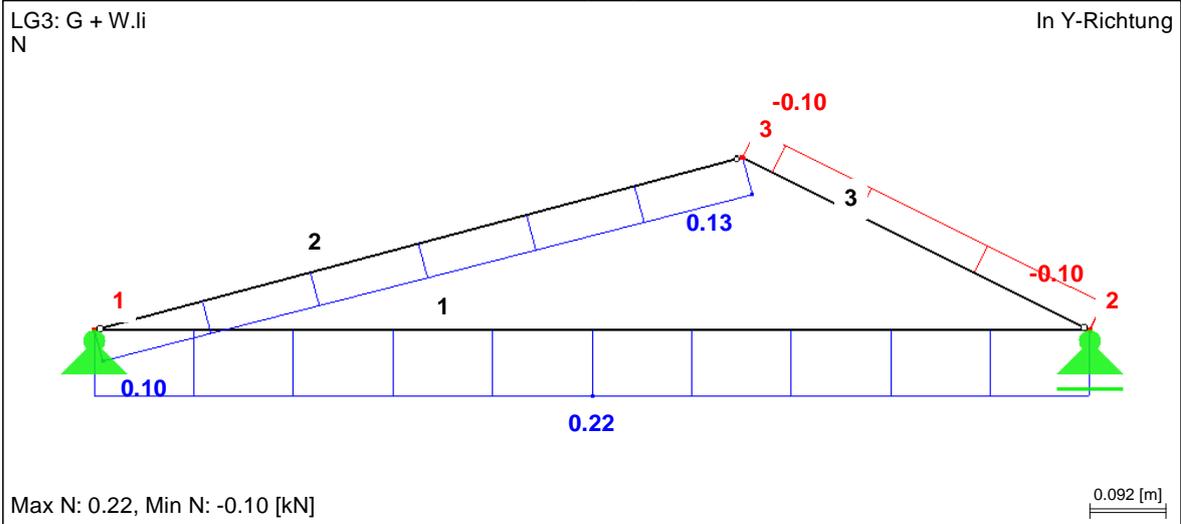
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, +Y, G + S + W.RE (V-z)**



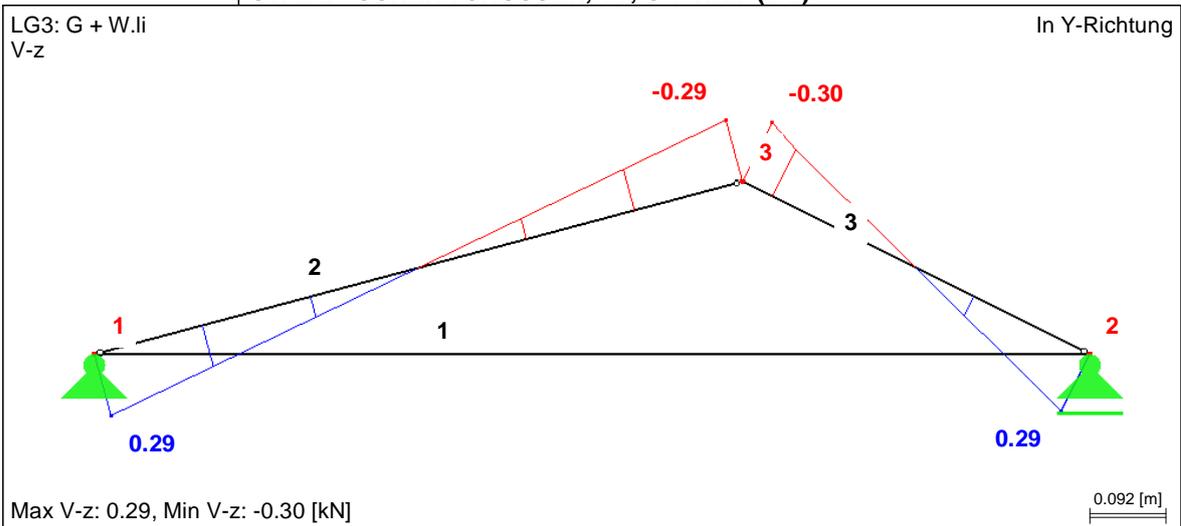
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, +Y, G + S + W.RE (M-y)**



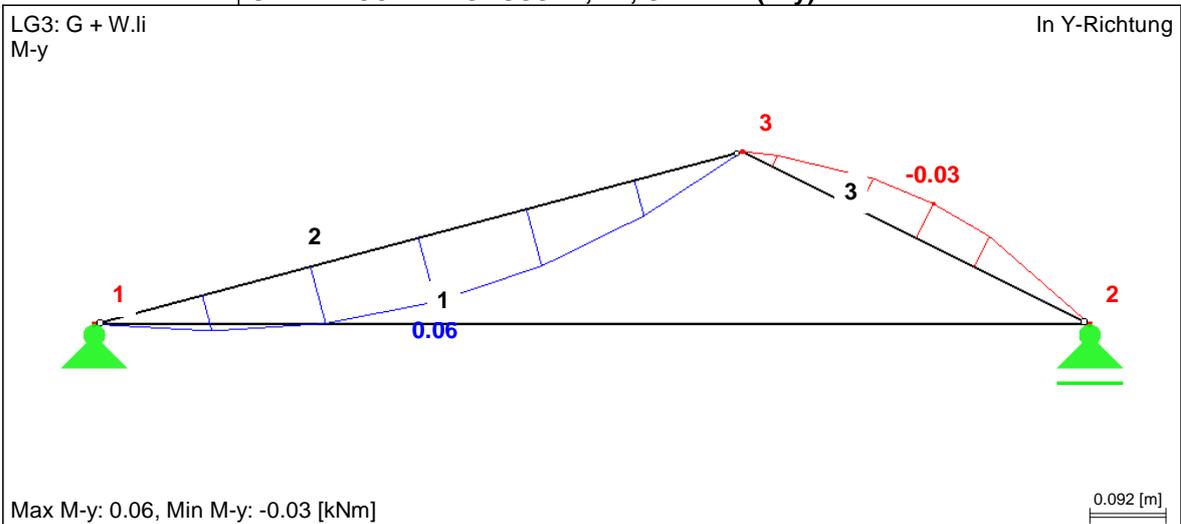
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, +Y, G + W.LI (N)



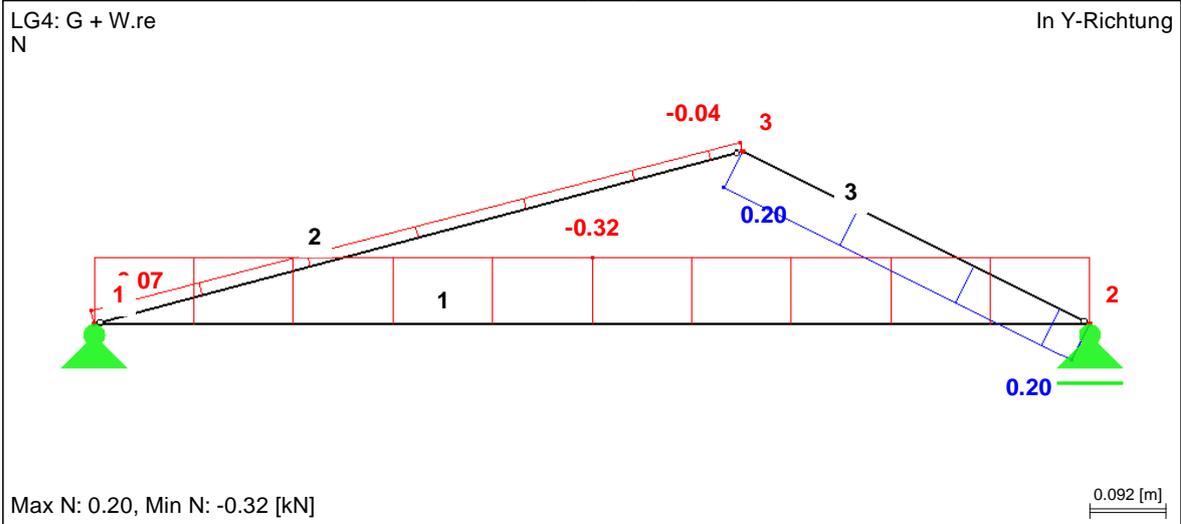
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, +Y, G + W.LI (V-z)



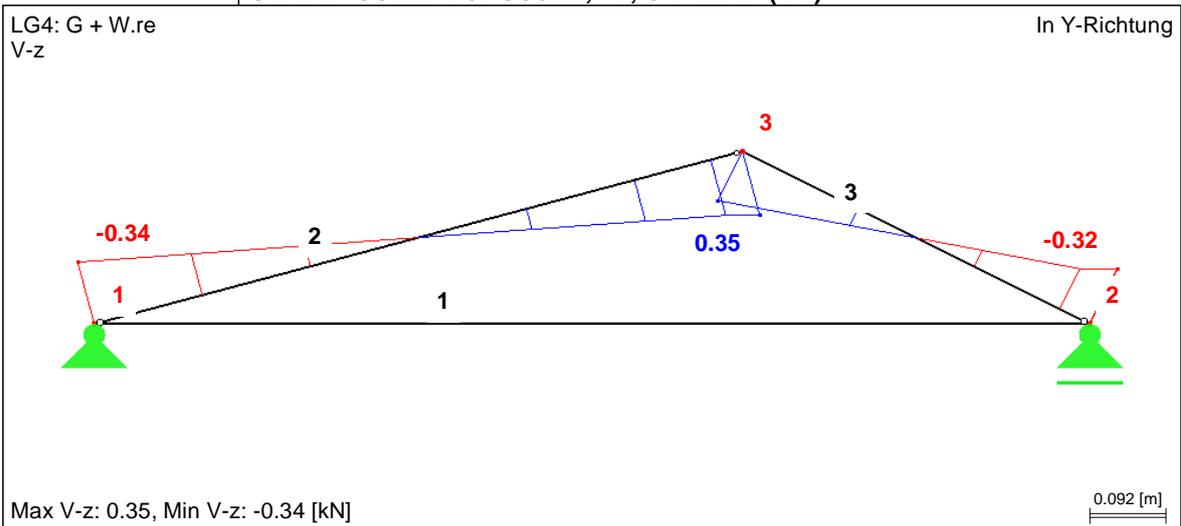
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, +Y, G + W.LI (M-y)



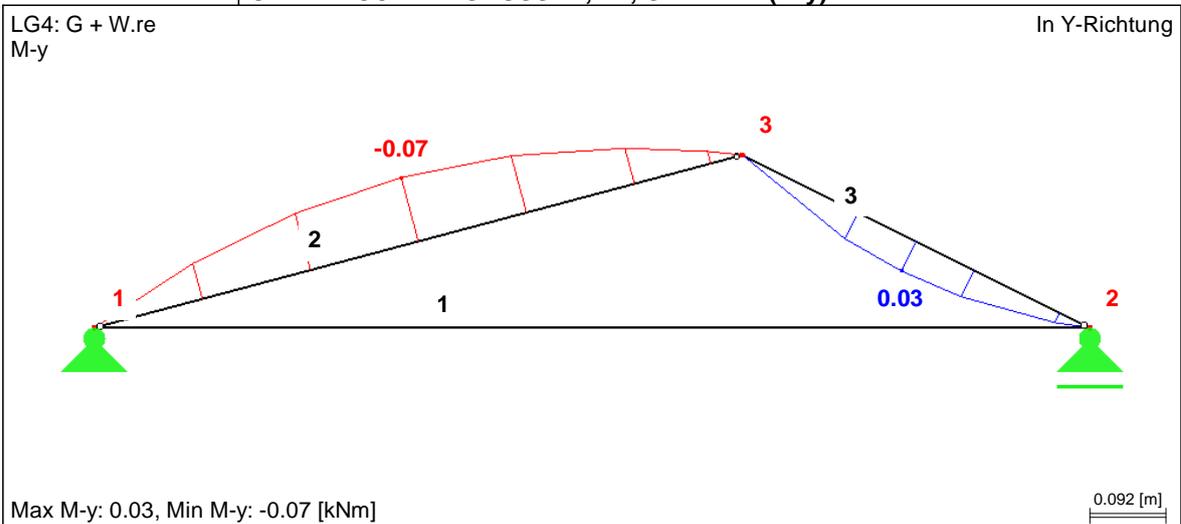
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, +Y, G + W.RE (N)



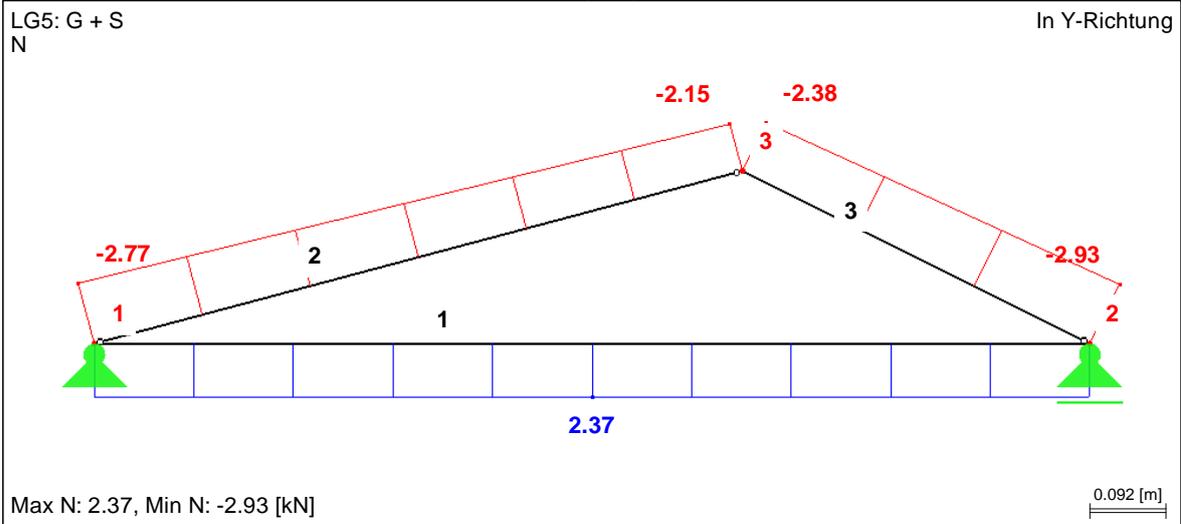
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, +Y, G + W.RE (V-z)



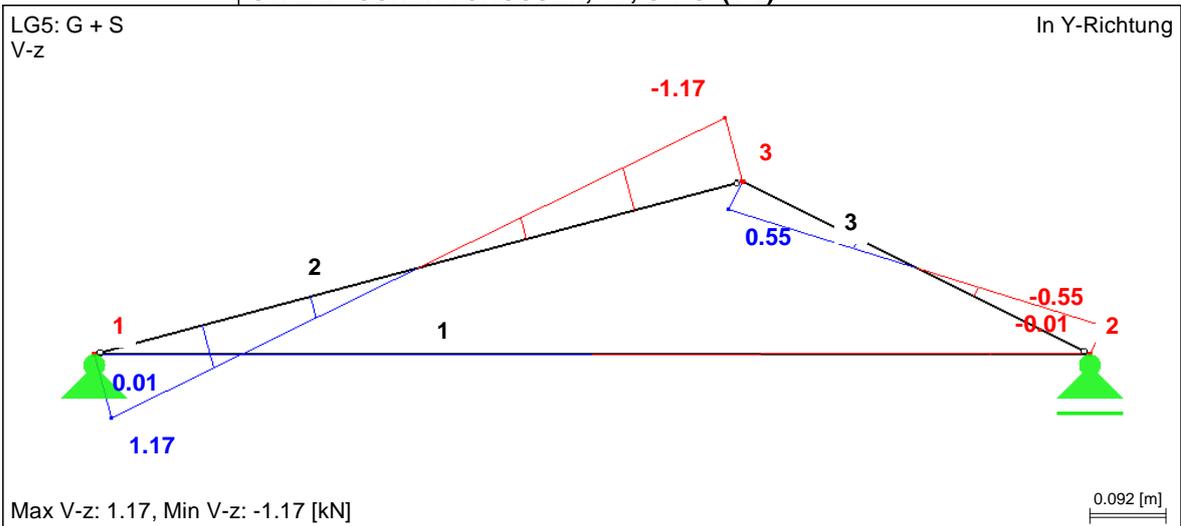
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, +Y, G + W.RE (M-y)



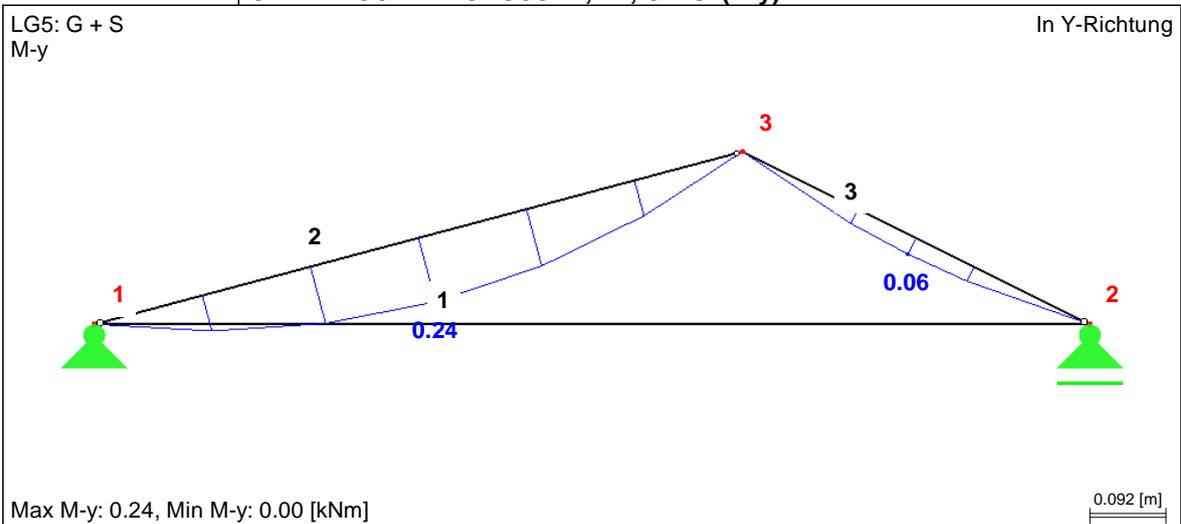
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, +Y, G + S (N)



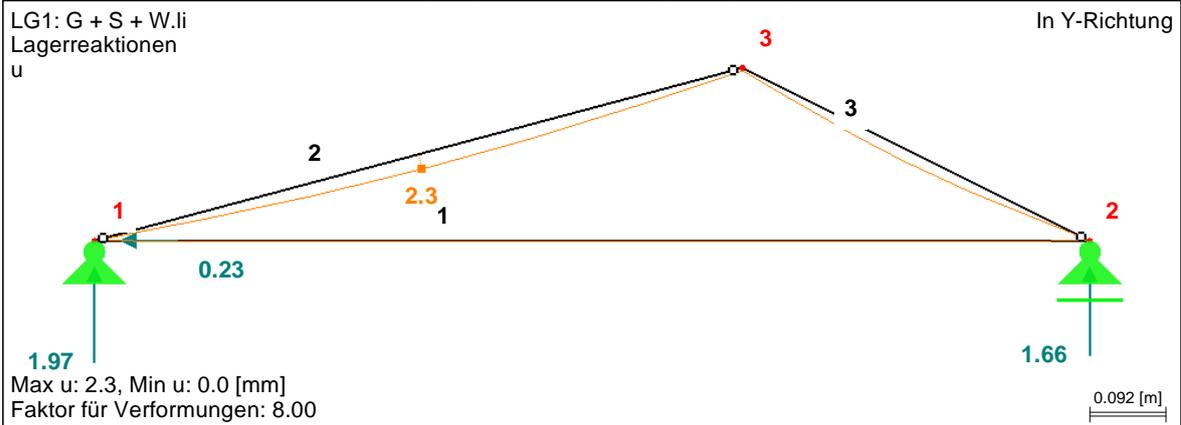
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, +Y, G + S (V-z)



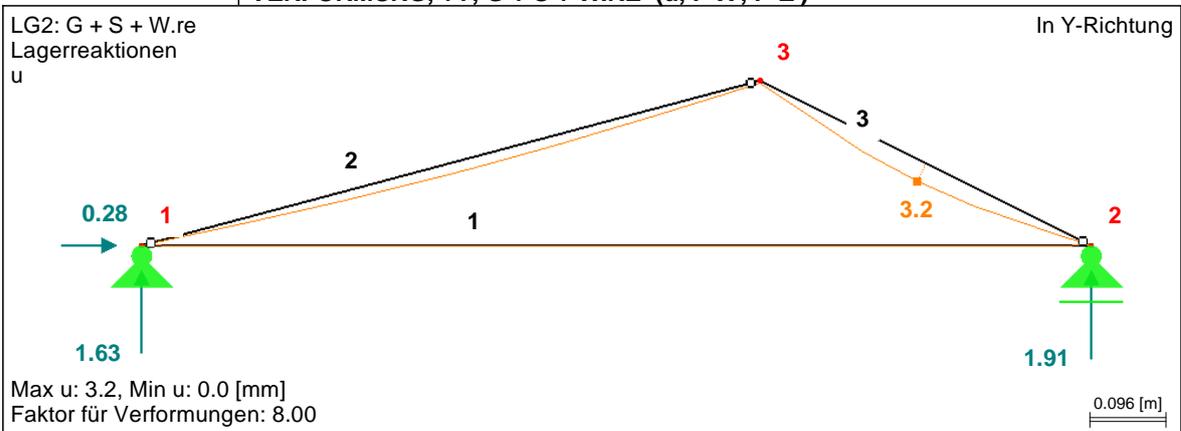
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, +Y, G + S (M-y)



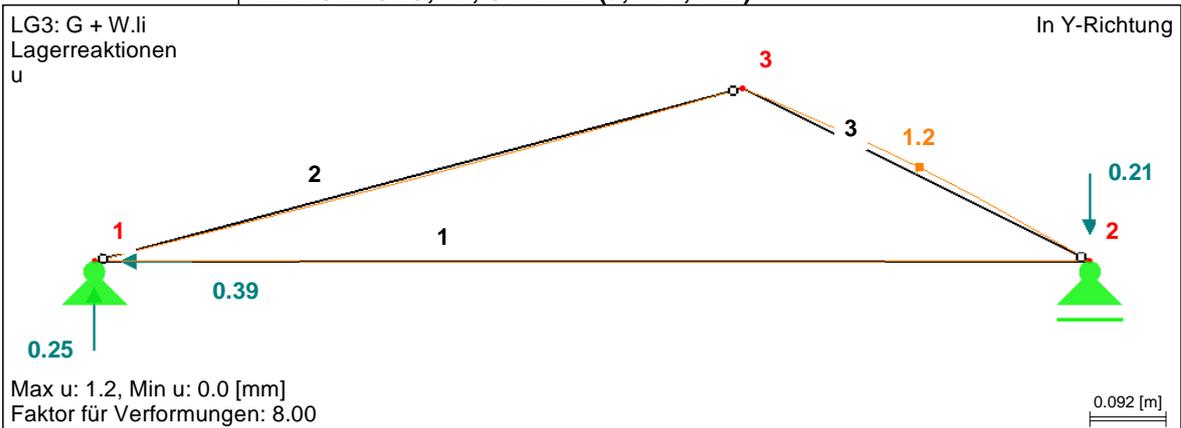
■ **VERFORMUNG, +Y, G + S + W.LI (u, P-X', P-Z')**



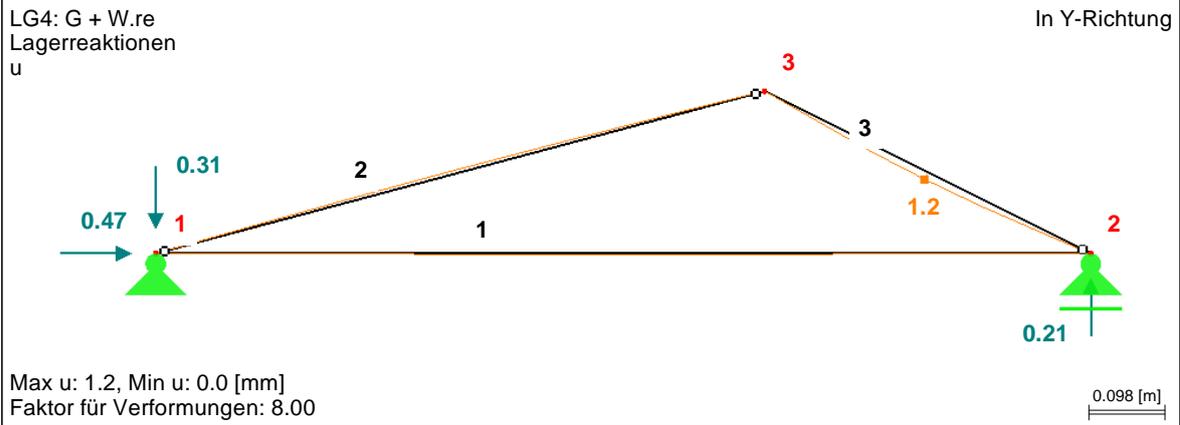
■ **VERFORMUNG, +Y, G + S + W.RE (u, P-X', P-Z')**



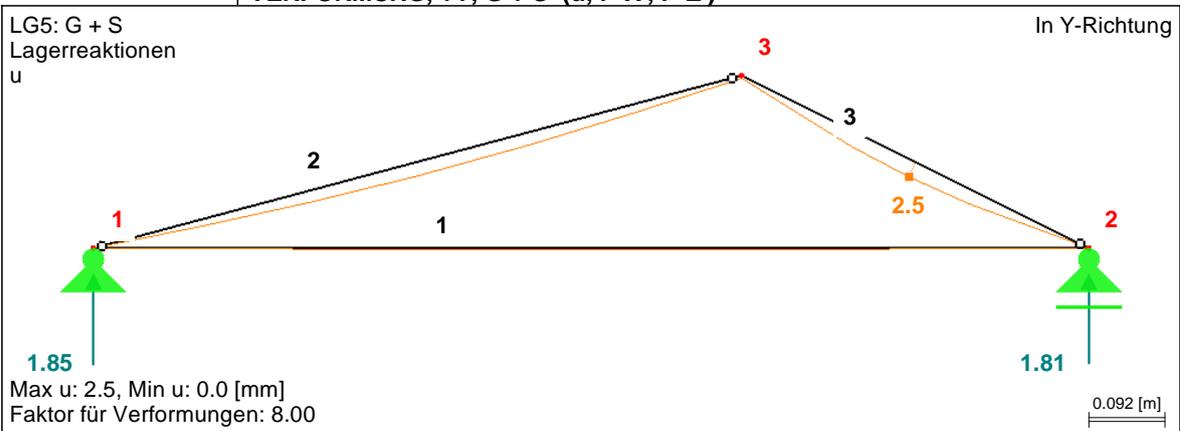
■ **VERFORMUNG, +Y, G + W.LI (u, P-X', P-Z')**



■ **VERFORMUNG, +Y, G + W.RE (u, P-X', P-Z')**



■ **VERFORMUNG, +Y, G + S (u, P-X', P-Z')**



■ **BASISANGABEN**

BERECHNUNGSART

- | | |
|--|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Statik | <input checked="" type="checkbox"/> Theorie I. Ordnung (lineare Berechnung) |
| <input type="checkbox"/> Nachweis | <input type="checkbox"/> Theorie II. Ordnung (nichtlinear nach Timoshenko) |
| <input type="checkbox"/> Dynamik | <input type="checkbox"/> Theorie großer Verschiebungen (nichtlinear nach Newton-Raphson) |
| | <input type="checkbox"/> Durchschlagproblem (nichtlinear nach Newton-Raphson) |
| <input checked="" type="checkbox"/> Lastfälle | <input type="checkbox"/> Bemessungsfälle |
| <input checked="" type="checkbox"/> LF-Gruppen | <input type="checkbox"/> Dynamikfälle |
| <input type="checkbox"/> LF-Kombinationen | <input type="checkbox"/> Knickfiguren |

STRUKTURKENNWERTE

- | | | |
|---|------------------|--------------------|
| <input type="checkbox"/> 1D-Durchlaufträger | 3 Knoten | 3 Stäbe |
| <input checked="" type="checkbox"/> 2D-Stabwerk | 1 Materialien | 0 Seilstäbe |
| <input type="checkbox"/> 3D-Stabwerk | 3 Querschnitte | 0 Voutenstäbe |
| <input type="checkbox"/> Trägerrost | 1 Stabendgelenke | 0 El. gebet. Stäbe |
| | 0 Stabteilungen | 0 Stabzüge |

■ **KNOTEN**

Knoten Nr.	Bezugs-Knoten	Koordinaten System	Knotenkoordinaten		Kommentar
			X [m]	Z [m]	
1	-	Kartesisch	0.000	0.000	
2	-	Kartesisch	1.136	0.000	
3	-	Kartesisch	0.759	0.276	

■ **MATERIALIEN**

Material Nr.	Material-Bezeichnung	Elast.-Modul E [kN/cm ²]	Schubmodul G [kN/cm ²]	Sp. Gewicht γ [kN/m ³]	Wärmedehnz. α [1/°C]	Beiwert γ_M [-]
1	Aluminium EN AW-6060 T66 (LF H) DIN 4113-1/A1: 2002-09	7000.00	2700.00	27.00	2.3000E-05	1.100

■ **QUERSCHNITTE**

Quers. Nr.	Querschnitts-Bezeichnung	Mater. Nr.	I _T [cm ⁴] A [cm ²]	I _y [cm ⁴] A _y [cm ²]	I _z [cm ⁴] A _z [cm ²]
3	DUENQ POS 02	1	2.59	0.91	0.38
4	DUENQ POS 01	1	2.40	1.69	0.47
5	RRO 50x30x2.6	1	3.83	12.30	2.24

■ **STABENDGELENKE**

Gelenk Nr.	Bezugs-system	Gelenk / Feder [kN/m], [kNm/rad]		
		N	V _z	M _y
1	Lokal x,y,z	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

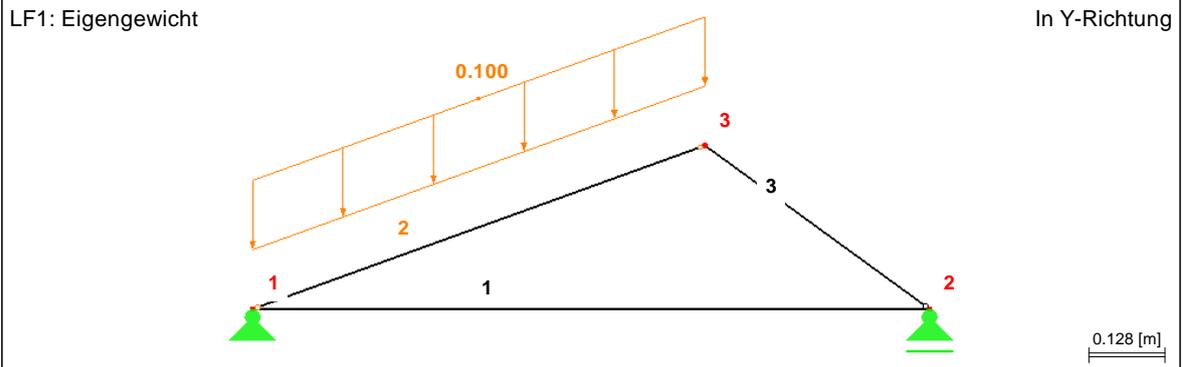
■ **STÄBE**

Stab Nr.	Stabtyp	Knoten		Drehung Typ	Drehung β [°]	Querschnitt		Gelenk		Exz. Nr.	Teil. Nr.	Länge L [m]	
		Anfang	Ende			Anfang	Ende	Anfang	Ende				
1	Balkenstab	1	2	Winkel	0	4	4	-	-	-	-	1.136	X
2	Balkenstab	1	3	Winkel	0	5	5	1	1	-	-	0.808	XZ
3	Balkenstab	3	2	Winkel	0	3	3	-	1	-	-	0.467	XZ

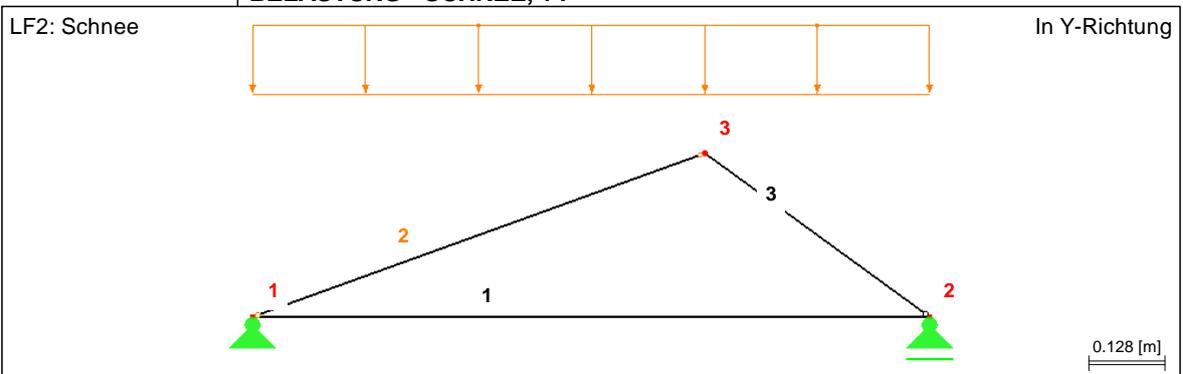
■ **KNOTENLAGER**

Lager Nr.	Knoten Nr.	Lagerdrehung [°] um Y	Lagerung bzw. Feder [kN/m] [kNm/rad]		
			u _x	u _z	ϕ_y
1	2	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	1	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

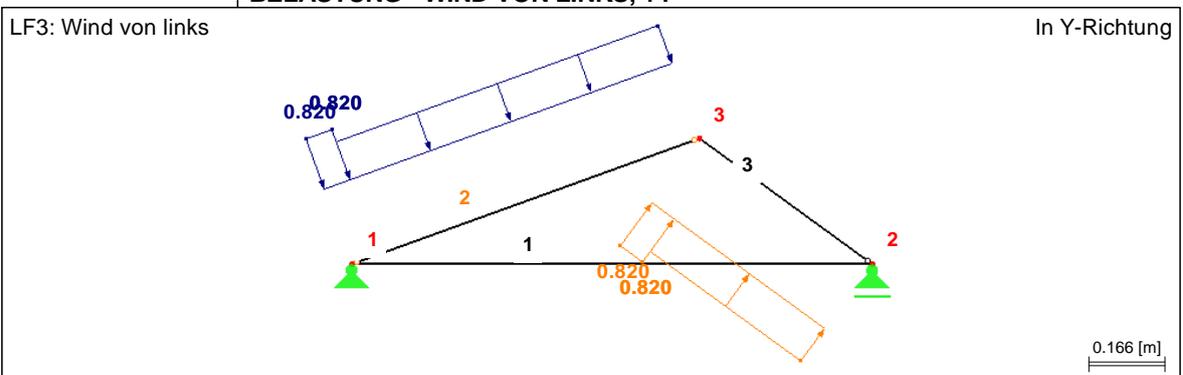
■ **BELASTUNG - EIGENGEWICHT, +Y**



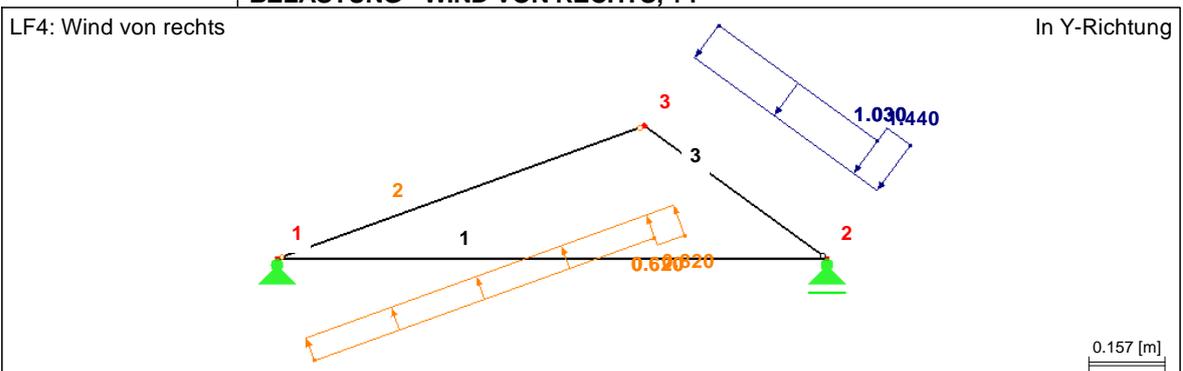
■ **BELASTUNG - SCHNEE, +Y**



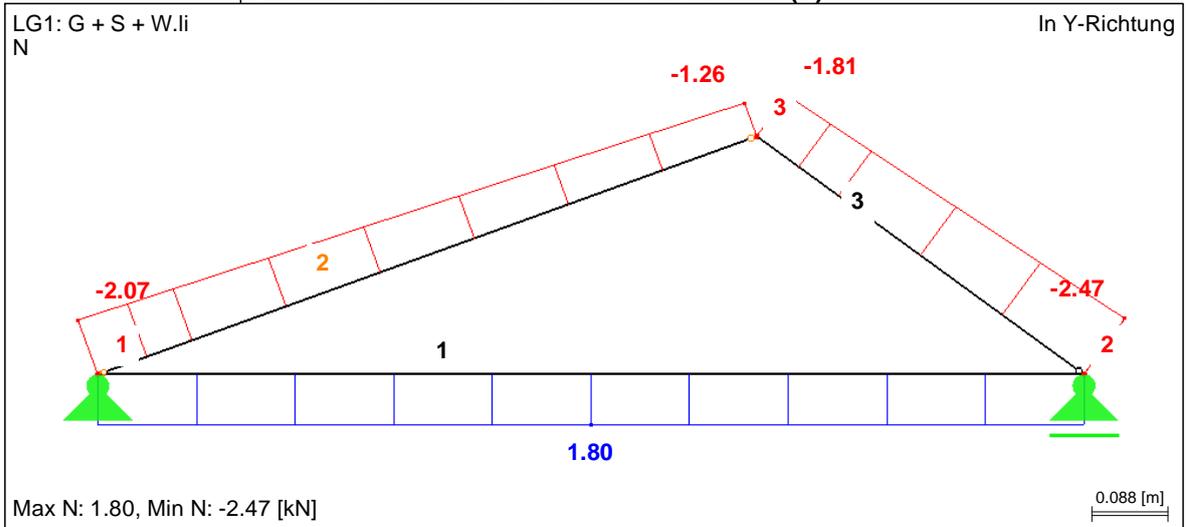
■ **BELASTUNG - WIND VON LINKS, +Y**



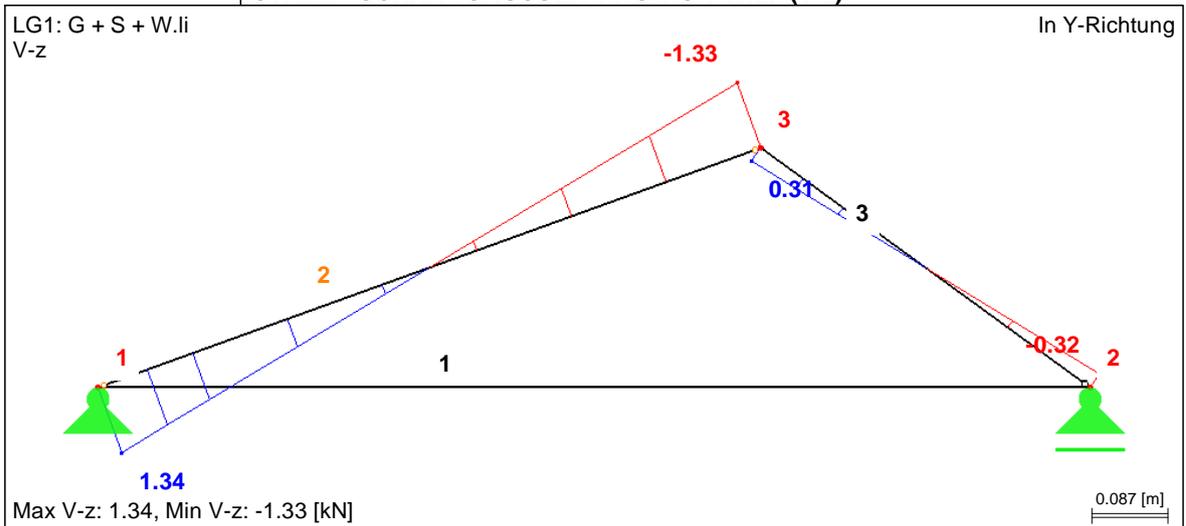
■ **BELASTUNG - WIND VON RECHTS, +Y**



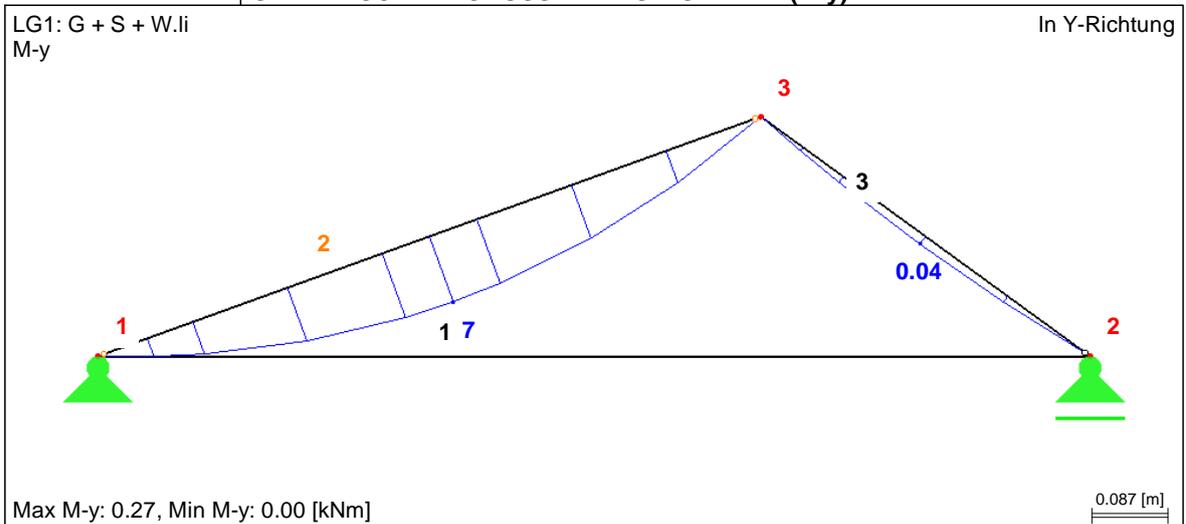
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN +Y G + S + W.LI (N)**



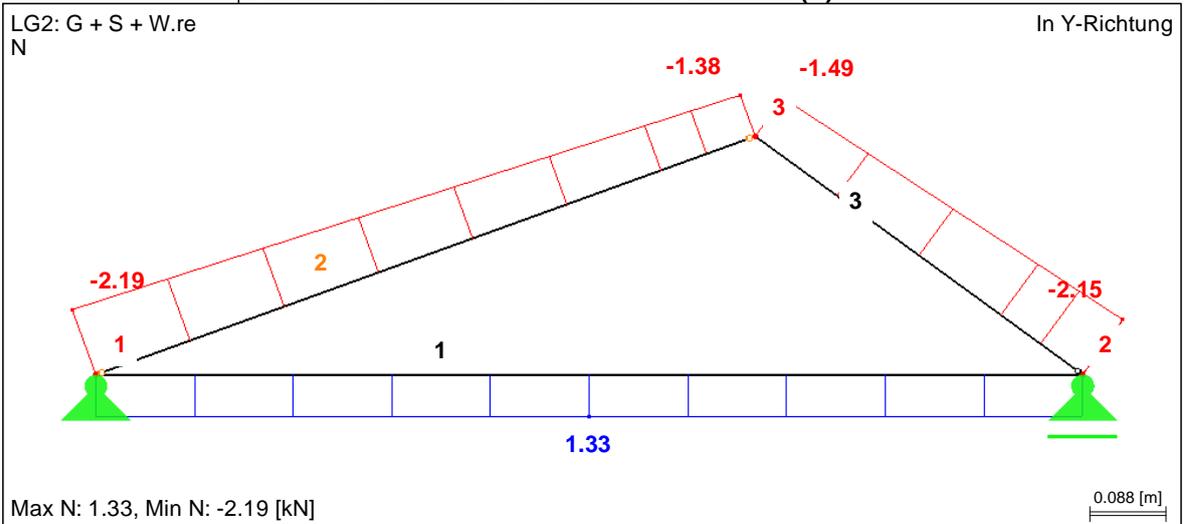
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN +Y G + S + W.LI (V-z)**



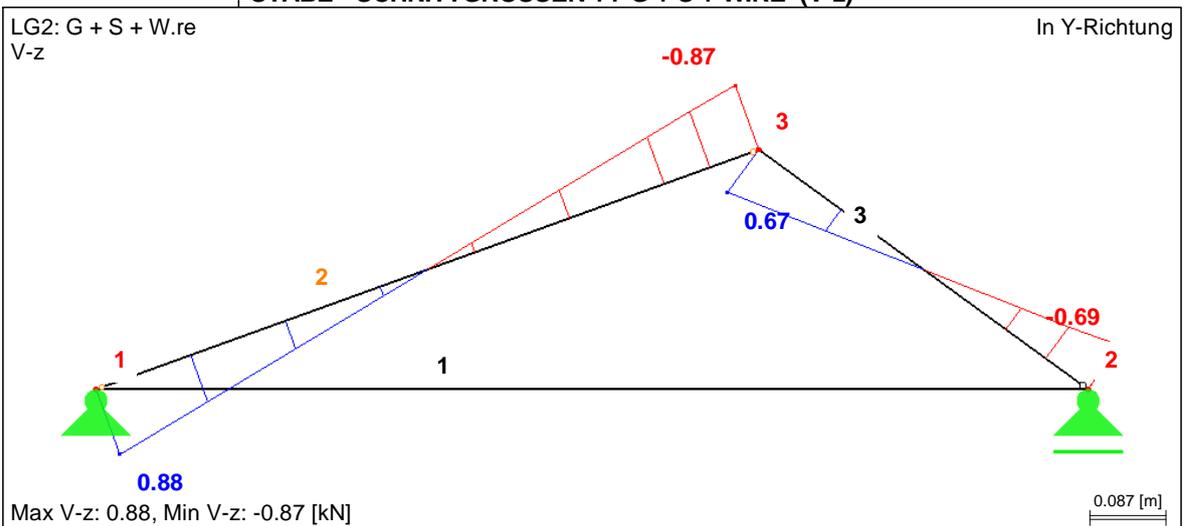
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN +Y G + S + W.LI (M-y)**



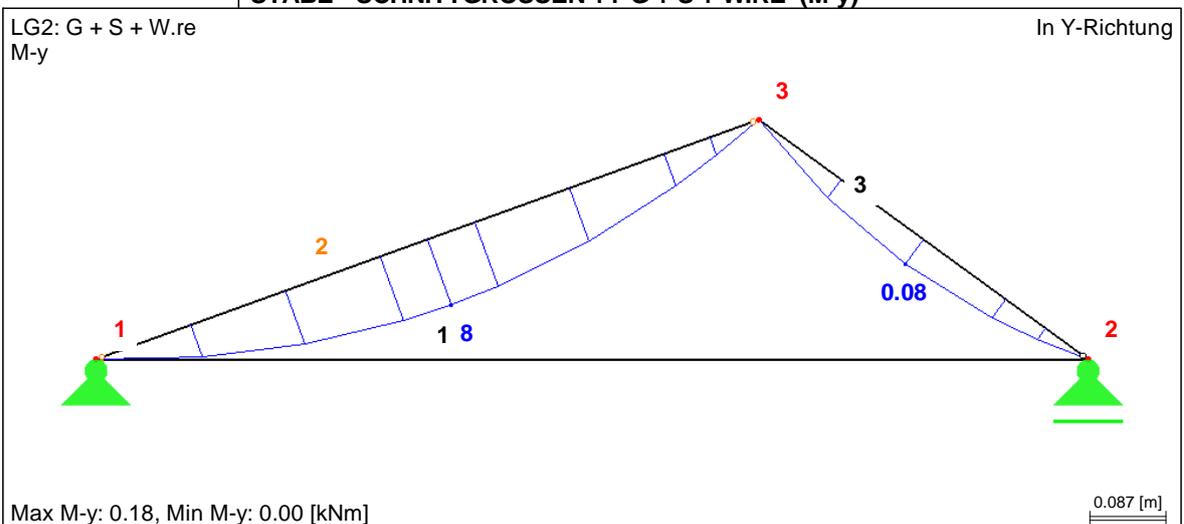
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN +Y G + S + W.RE (N)**



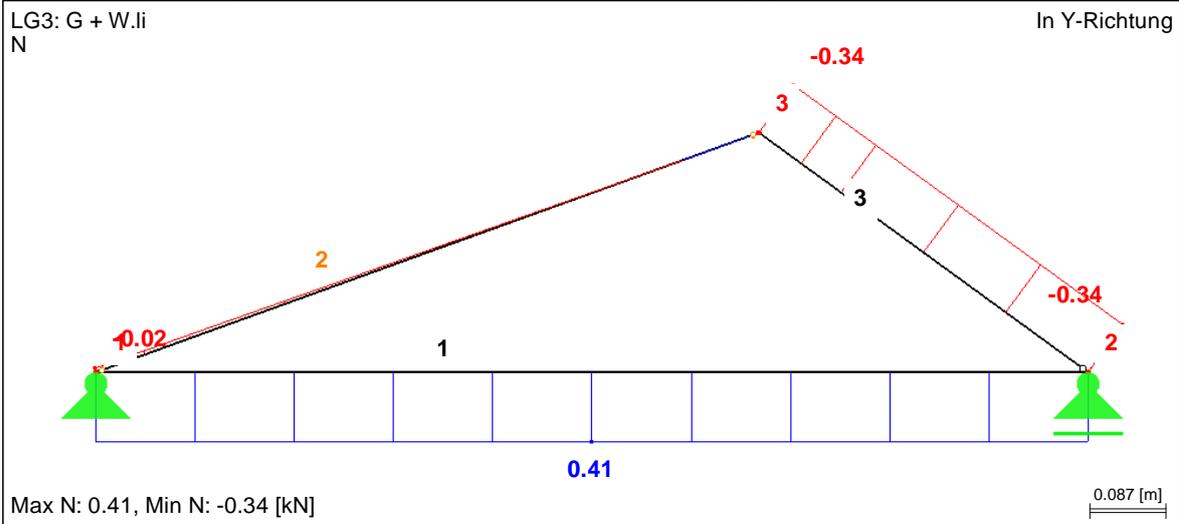
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN +Y G + S + W.RE (V-z)**



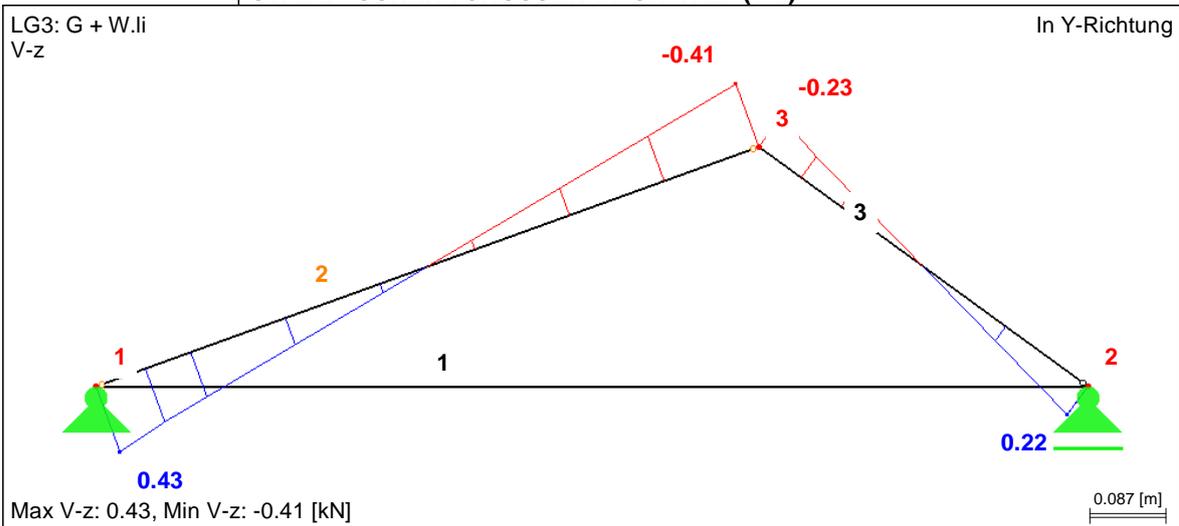
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN +Y G + S + W.RE (M-y)**



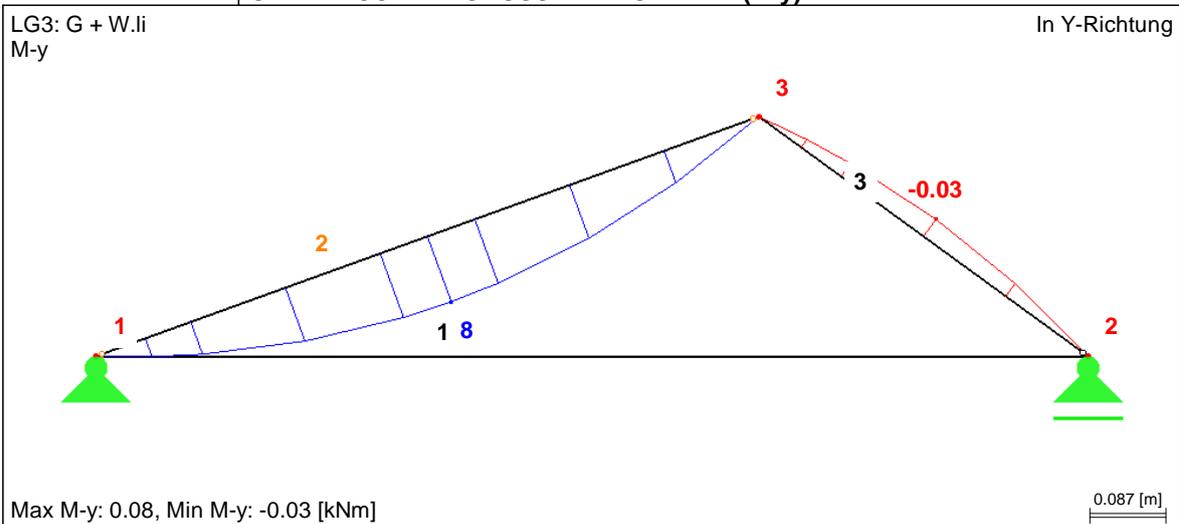
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN +Y G + W.LI (N)**



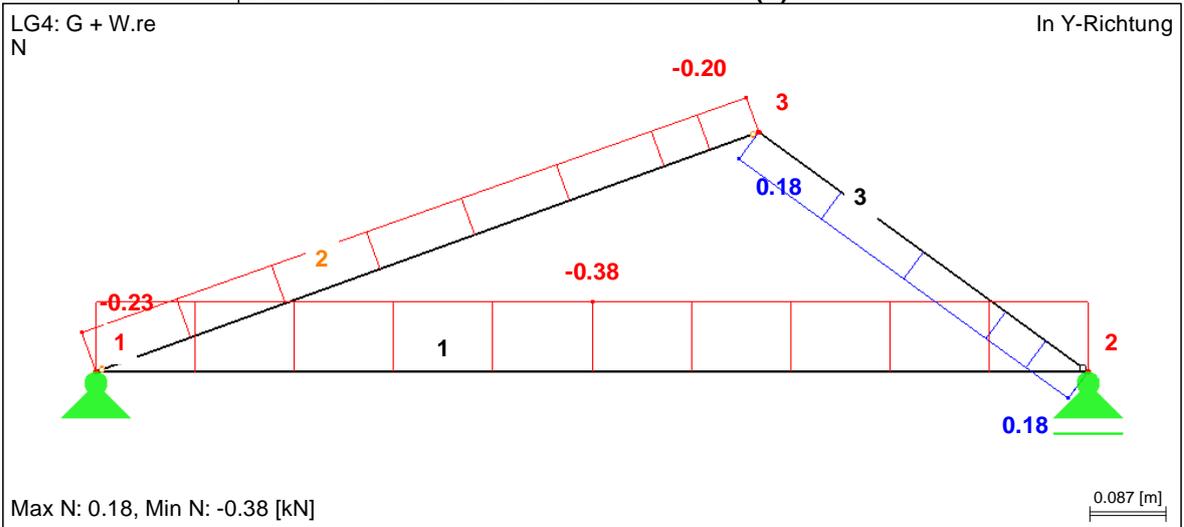
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN +Y G + W.LI (V-z)**



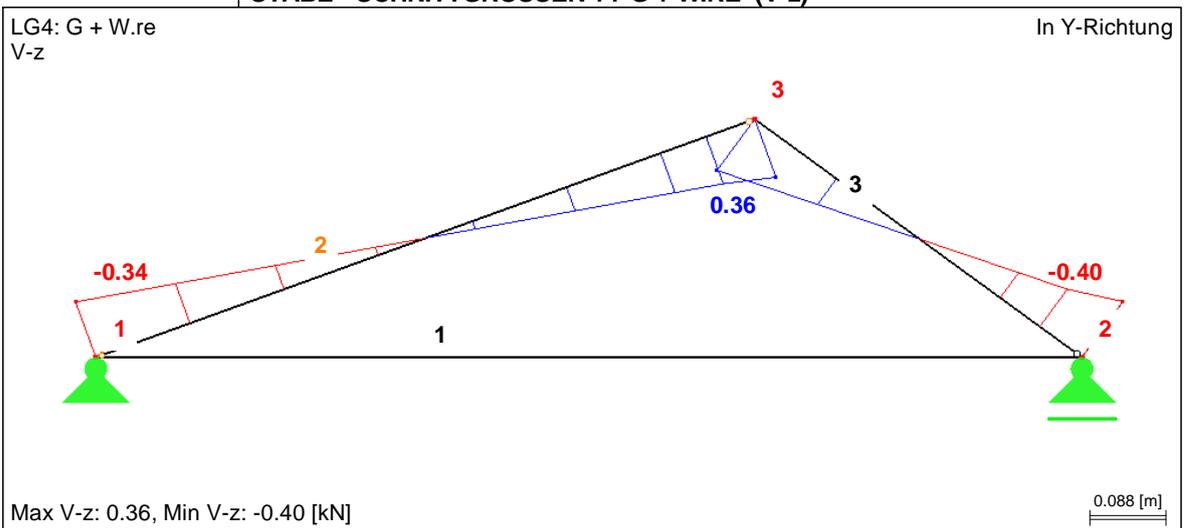
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN +Y G + W.LI (M-y)**



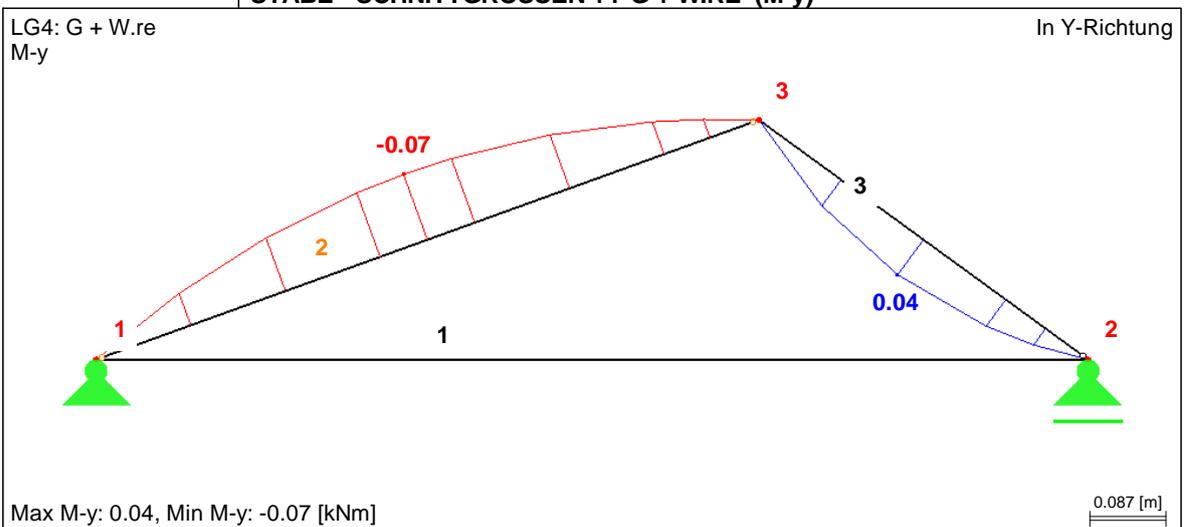
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN +Y G + W.RE (N)**



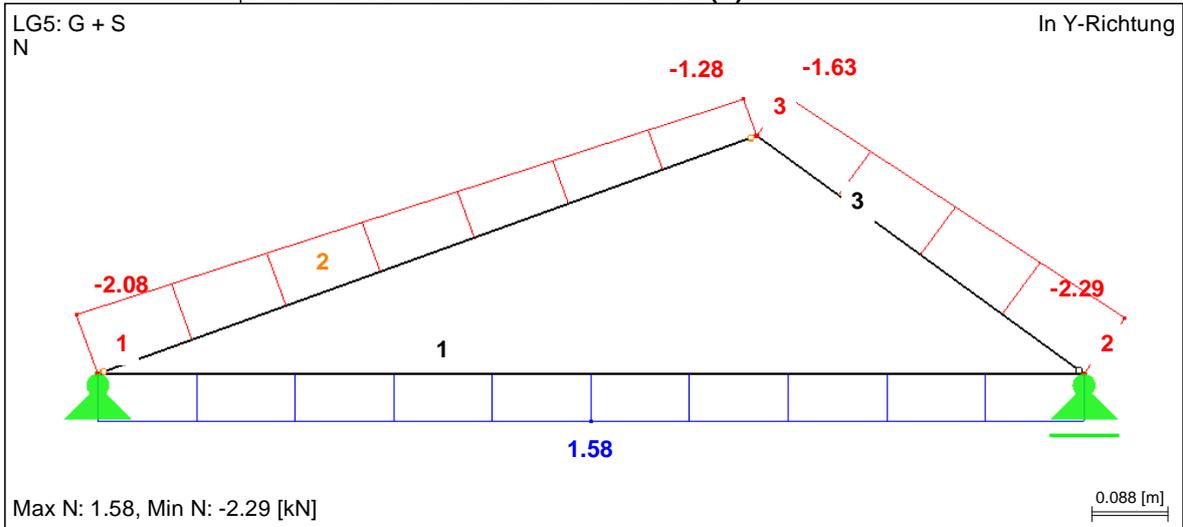
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN +Y G + W.RE (V-z)**



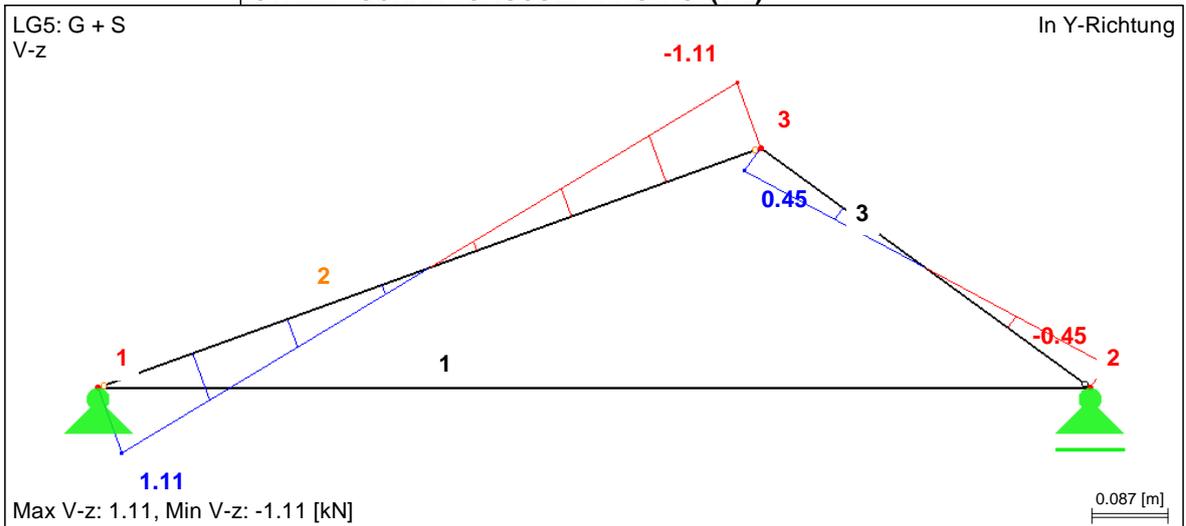
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN +Y G + W.RE (M-y)**



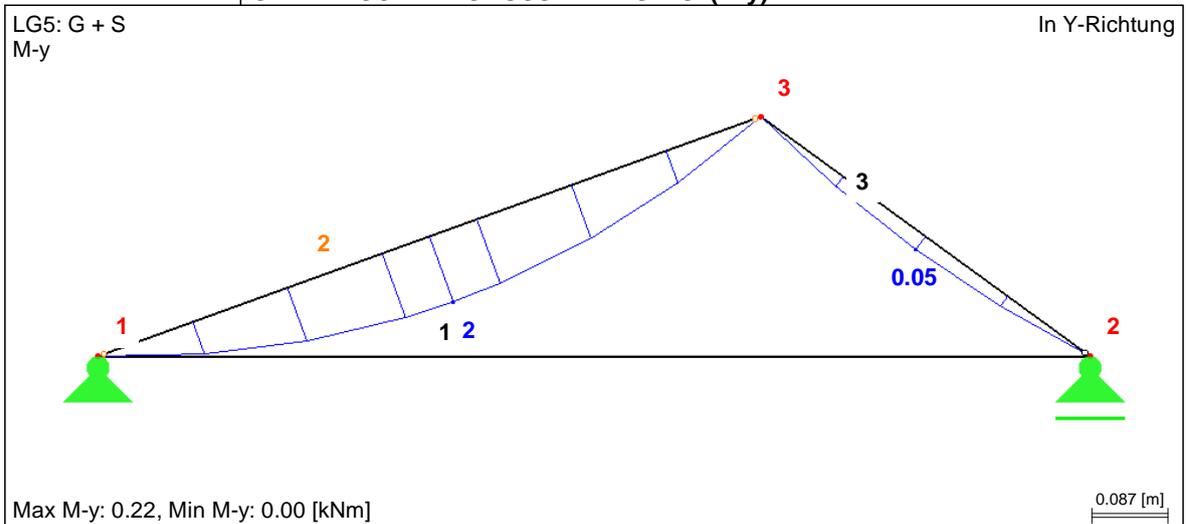
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN +Y G + S (N)**



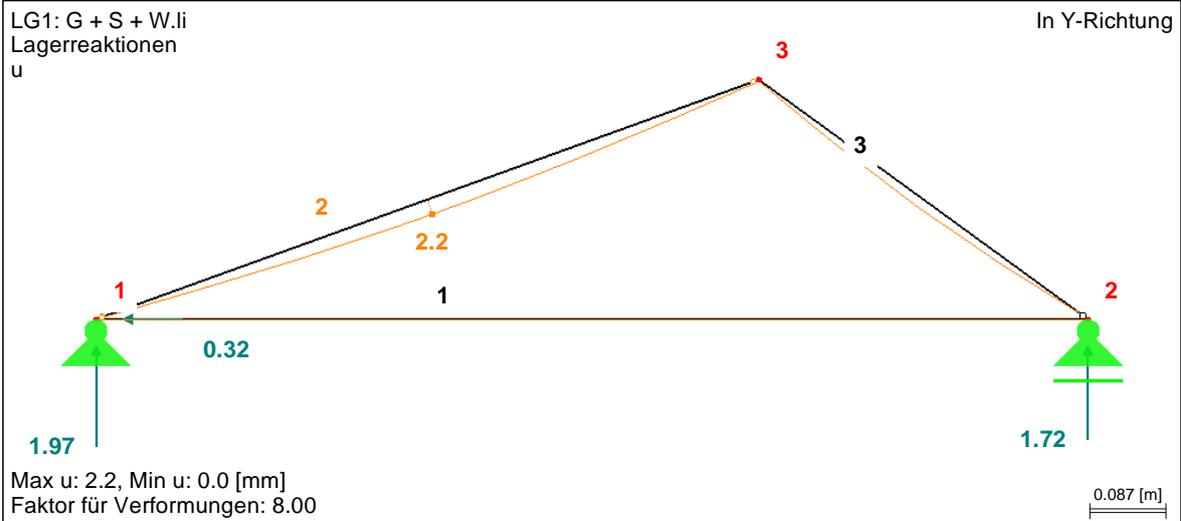
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN +Y G + S (V-z)**



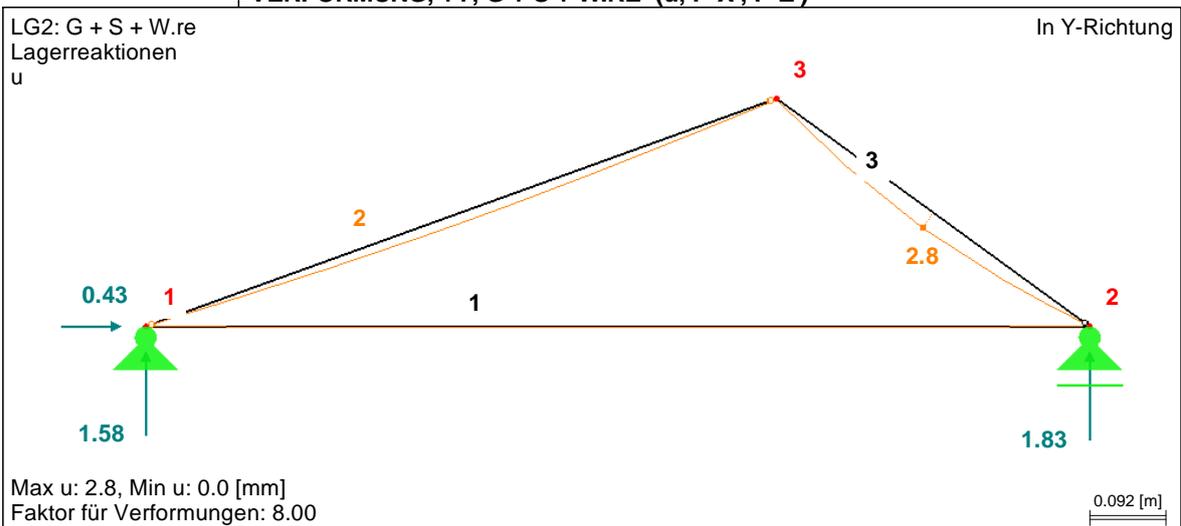
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN +Y G + S (M-y)**



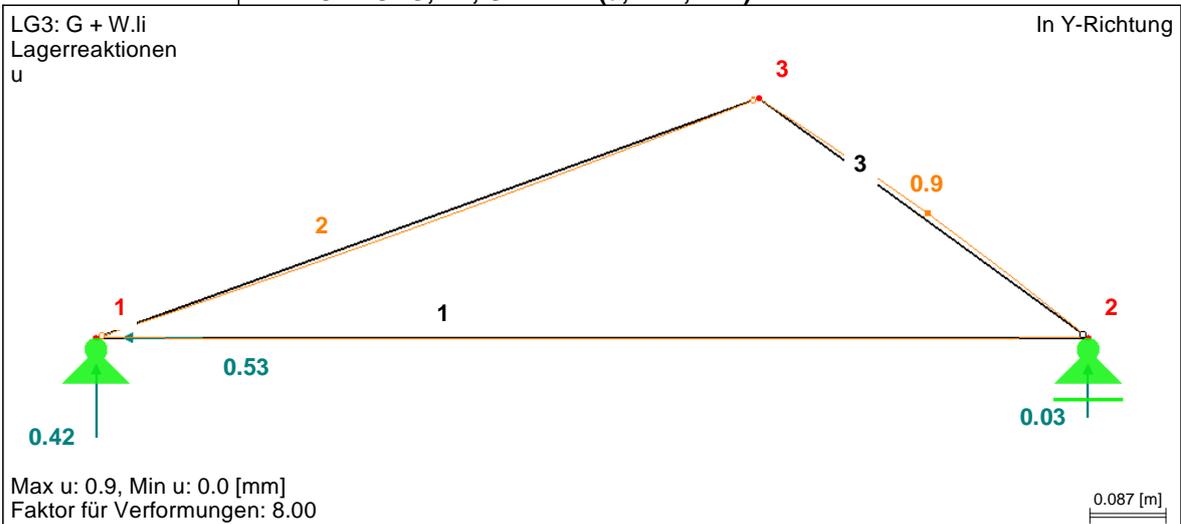
■ **VERFORMUNG, +Y, G + S + W.LI (u, P-X', P-Z')**



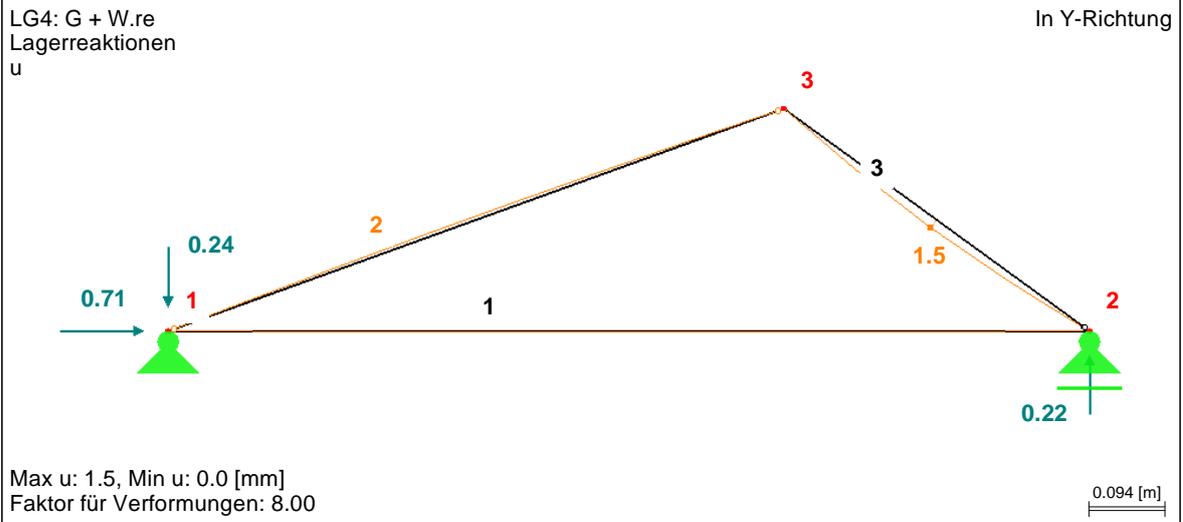
■ **VERFORMUNG, +Y, G + S + W.RE (u, P-X', P-Z')**



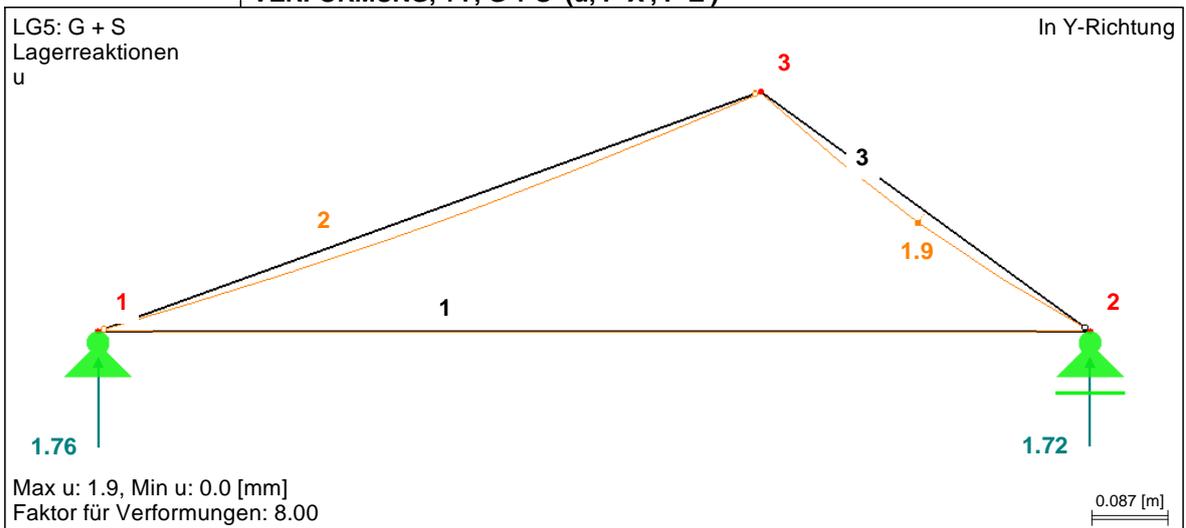
■ **VERFORMUNG, +Y, G + W.LI (u, P-X', P-Z')**



■ **VERFORMUNG, +Y, G + W.RE (u, P-X', P-Z')**



■ **VERFORMUNG, +Y, G + S (u, P-X', P-Z')**



■ BASISANGABEN

BERECHNUNGSART

- | | |
|--|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Statik | <input checked="" type="checkbox"/> Theorie I. Ordnung (lineare Berechnung) |
| <input type="checkbox"/> Nachweis | <input type="checkbox"/> Theorie II. Ordnung (nichtlinear nach Timoshenko) |
| <input type="checkbox"/> Dynamik | <input type="checkbox"/> Theorie großer Verschiebungen (nichtlinear nach Newton-Raphson) |
| | <input type="checkbox"/> Durchschlagproblem (nichtlinear nach Newton-Raphson) |
| <input checked="" type="checkbox"/> Lastfälle | <input type="checkbox"/> Bemessungsfälle |
| <input checked="" type="checkbox"/> LF-Gruppen | <input type="checkbox"/> Dynamikfälle |
| <input type="checkbox"/> LF-Kombinationen | <input type="checkbox"/> Knickfiguren |

STRUKTURKENNWERTE

- | | | |
|---|------------------|--------------------|
| <input type="checkbox"/> 1D-Durchlaufträger | 3 Knoten | 3 Stäbe |
| <input checked="" type="checkbox"/> 2D-Stabwerk | 1 Materialien | 0 Seilstäbe |
| <input type="checkbox"/> 3D-Stabwerk | 3 Querschnitte | 0 Voutenstäbe |
| <input type="checkbox"/> Trägerrost | 1 Stabendgelenke | 0 El. gebet. Stäbe |
| | 0 Stabteilungen | 0 Stabzüge |

■ KNOTEN

Knoten Nr.	Bezugs-Knoten	Koordinaten System	Knotenkoordinaten		Kommentar
			X [m]	Z [m]	
1	-	Kartesisch	0.000	0.000	
2	-	Kartesisch	-1.051	0.000	
3	-	Kartesisch	-0.732	0.341	

■ MATERIALIEN

Material Nr.	Material-Bezeichnung	Elast.-Modul E [kN/cm ²]	Schubmodul G [kN/cm ²]	Sp. Gewicht γ [kN/m ³]	Wärmedehnz. α [1/°C]	Beiwert γ_M [-]
1	Aluminium EN AW-6060 T66 (LF H) DIN 4113-1/A1: 2002-09	7000.00	2700.00	27.00	2.3000E-05	1.100

■ QUERSCHNITTE

Quers. Nr.	Querschnitts-Bezeichnung	Mater. Nr.	I_T [cm ⁴] A [cm ²]	I_y [cm ⁴] A _y [cm ²]	I_z [cm ⁴] A _z [cm ²]
1	DUENQ POS 01	1	2.40	1.69	0.47
2	DUENQ POS 02	1	2.59	0.91	0.38
3	RRO 50x30x2.6	1	3.83	12.30	2.24

■ STABENDGELENKE

Gelenk Nr.	Bezugs-system	Gelenk / Feder [kN/m], [kNm/rad]		
		N	V _z	M _y
1	Lokal x,y,z	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

■ STÄBE

Stab Nr.	Stabtyp	Knoten		Drehung Typ	Drehung β [°]	Querschnitt		Gelenk		Exz. Nr.	Teil. Nr.	Länge L [m]	
		Anfang	Ende			Anfang	Ende	Anfang	Ende				
1	Balkenstab	1	2	Winkel	0	1	1	-	-	-	-	1.051	X
2	Balkenstab	1	3	Winkel	0	3	3	1	1	-	-	0.808	XZ
3	Balkenstab	2	3	Winkel	0	2	2	1	-	-	-	0.467	XZ

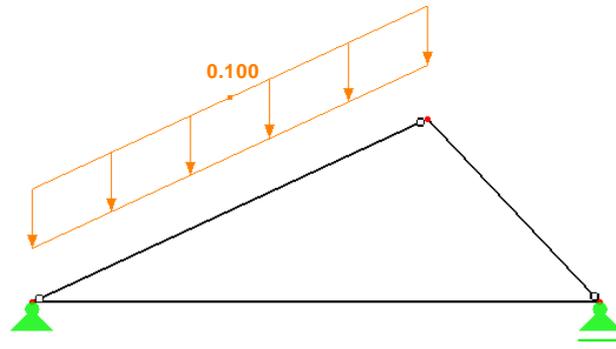
■ KNOTENLAGER

Lager Nr.	Knoten Nr.	Lagerdrehung [°] um Y	Lagerung bzw. Feder [kN/m] [kNm/rad]		
			u _x	u _z	ϕ_y
1	1	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	2	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

■ **BELASTUNG - EIGENGEWICHT, -Y**

LF1: Eigengewicht

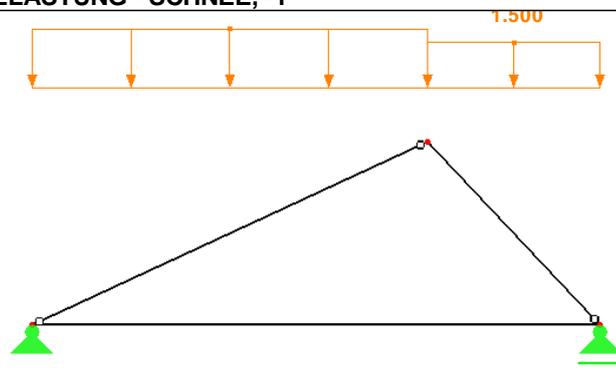
Entgegen der Y-Richtung



■ **BELASTUNG - SCHNEE, -Y**

LF2: Schnee

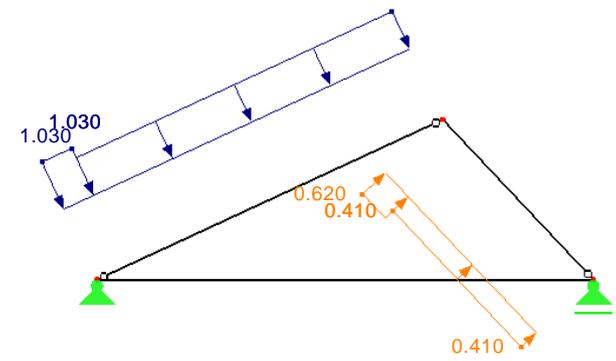
Entgegen der Y-Richtung



■ **BELASTUNG - WIND VON LINKS, -Y**

LF3: Wind von links

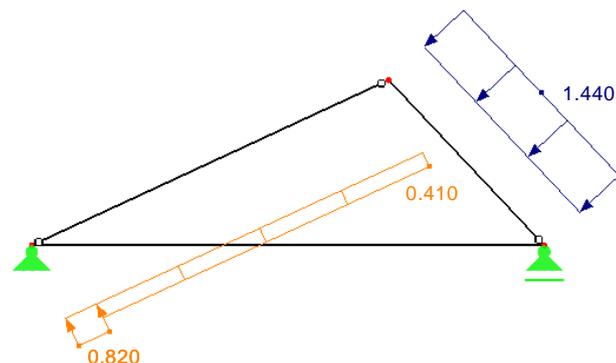
Entgegen der Y-Richtung



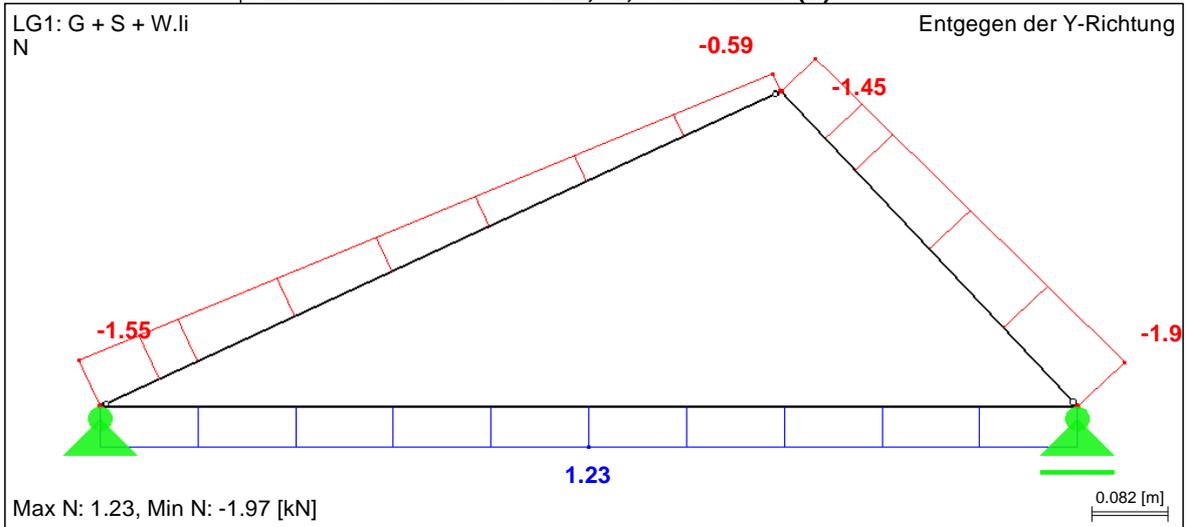
■ **BELASTUNG - WIND VON RECHTS, -Y**

LF4: Wind von rechts

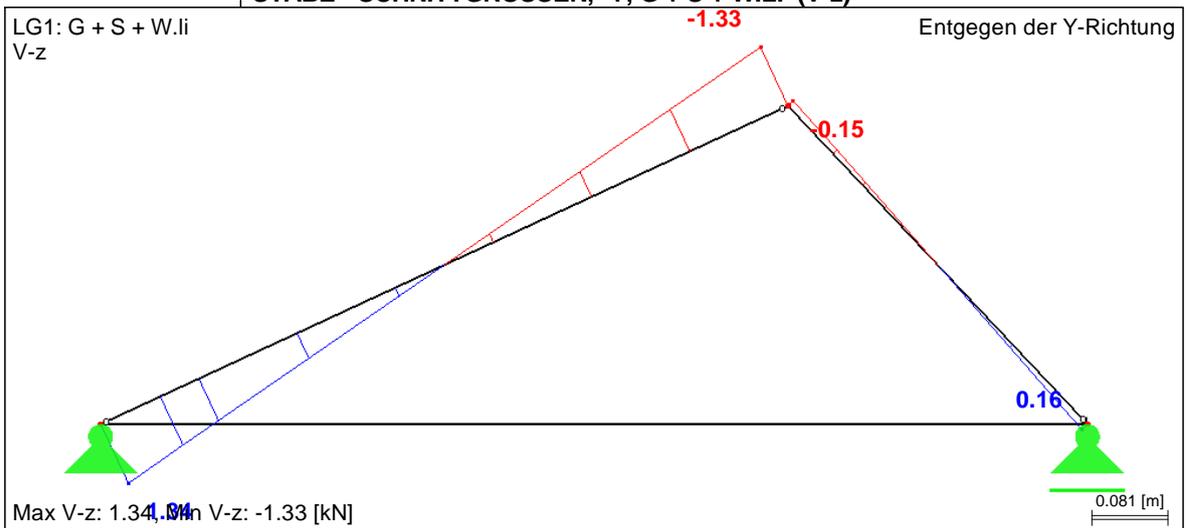
Entgegen der Y-Richtung



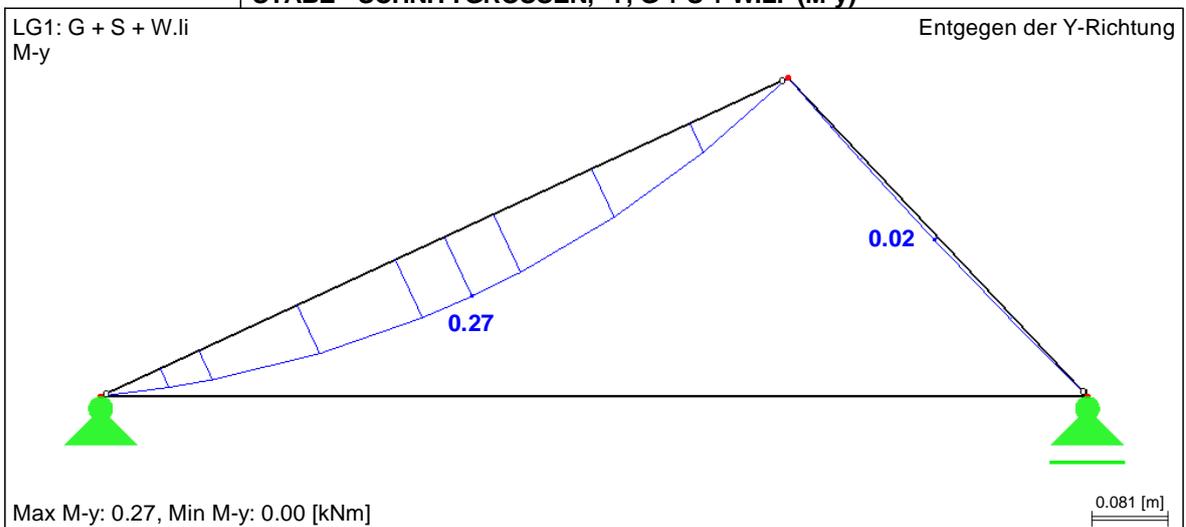
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S + W.LI (N)**



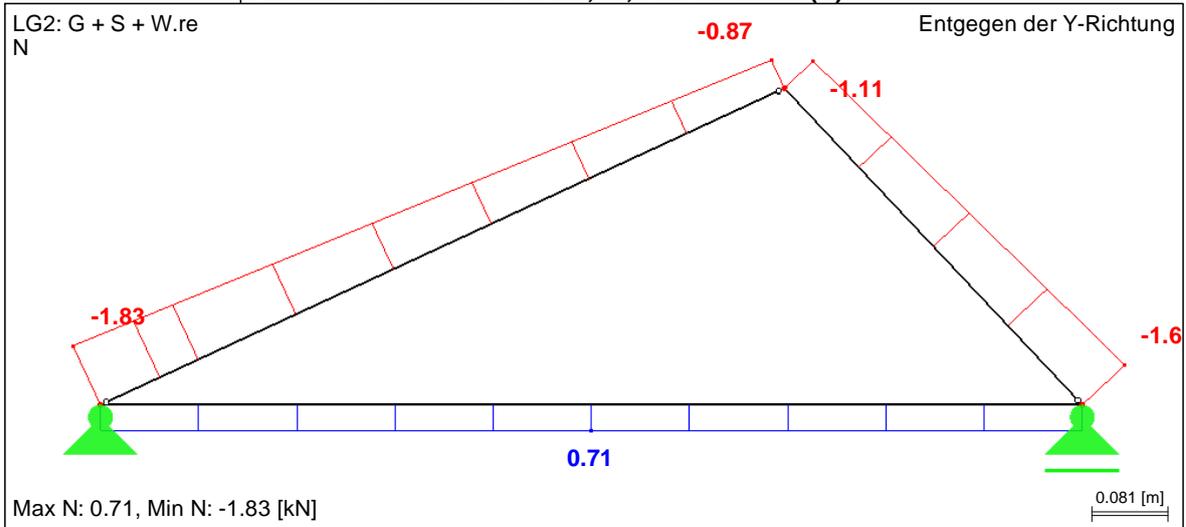
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S + W.LI (V-z)**



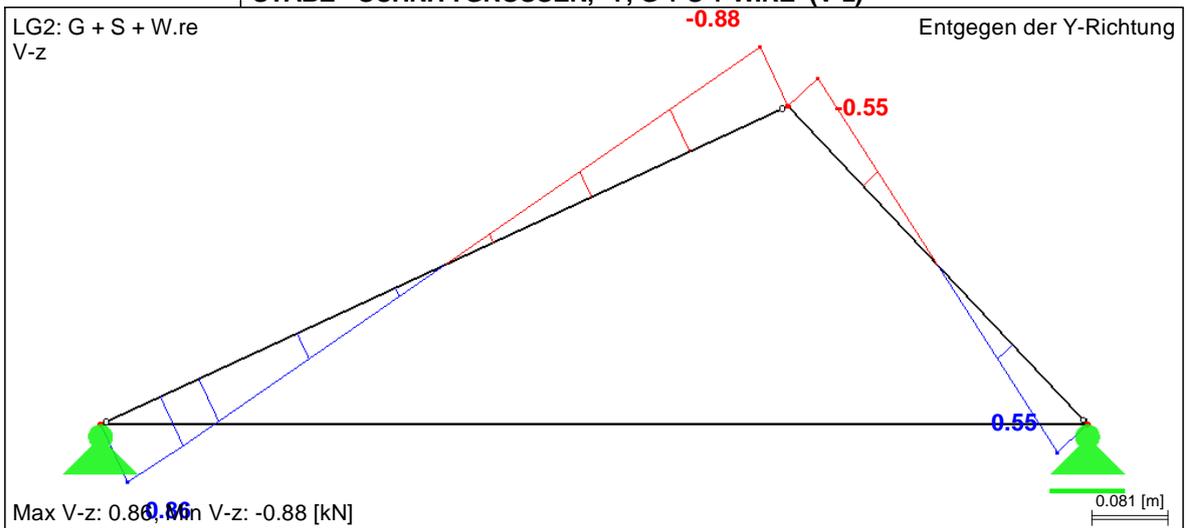
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S + W.LI (M-y)**



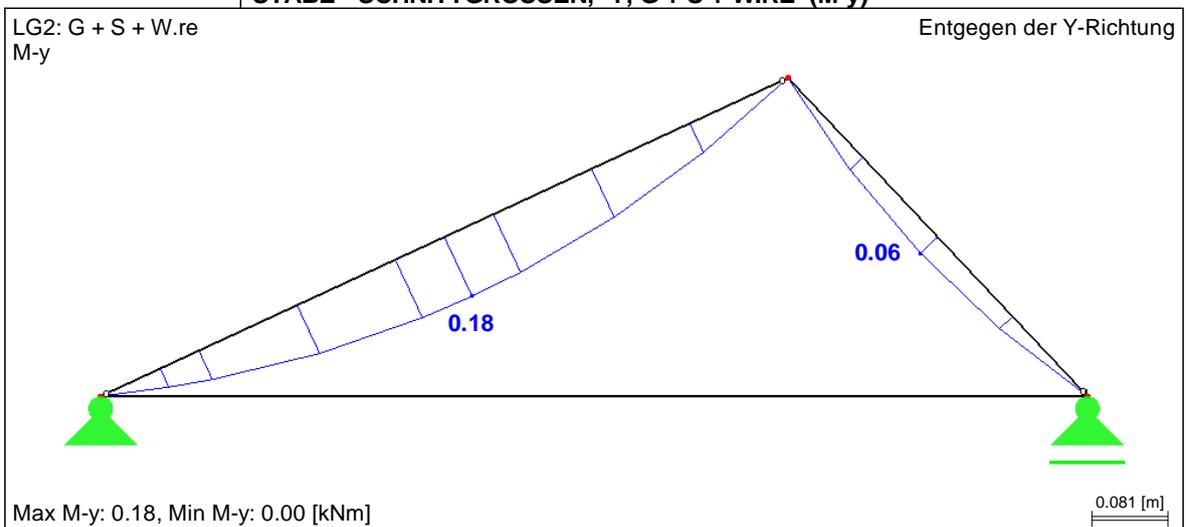
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S + W.RE (N)**



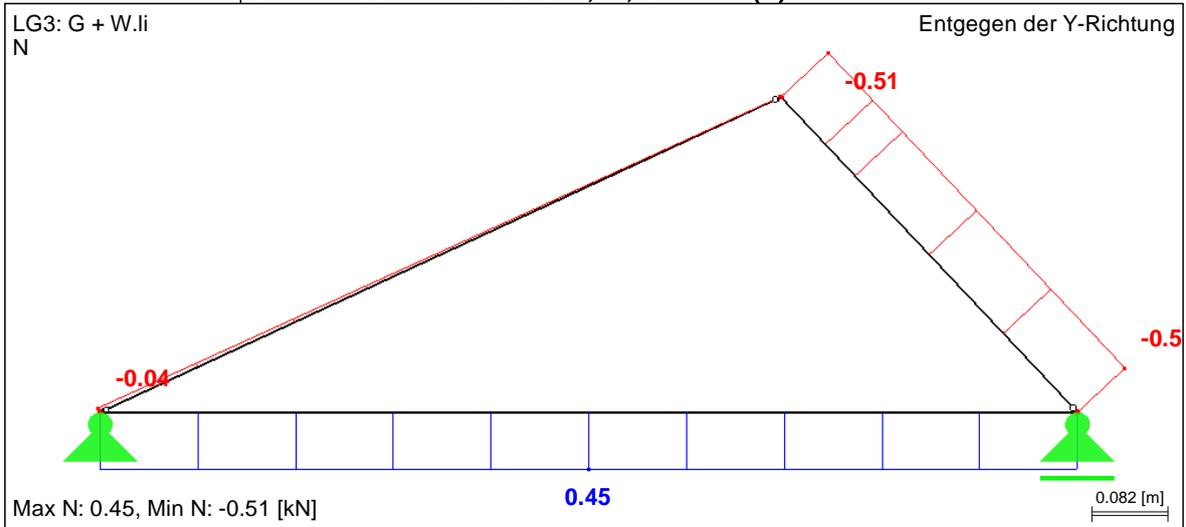
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S + W.RE (V-z)**



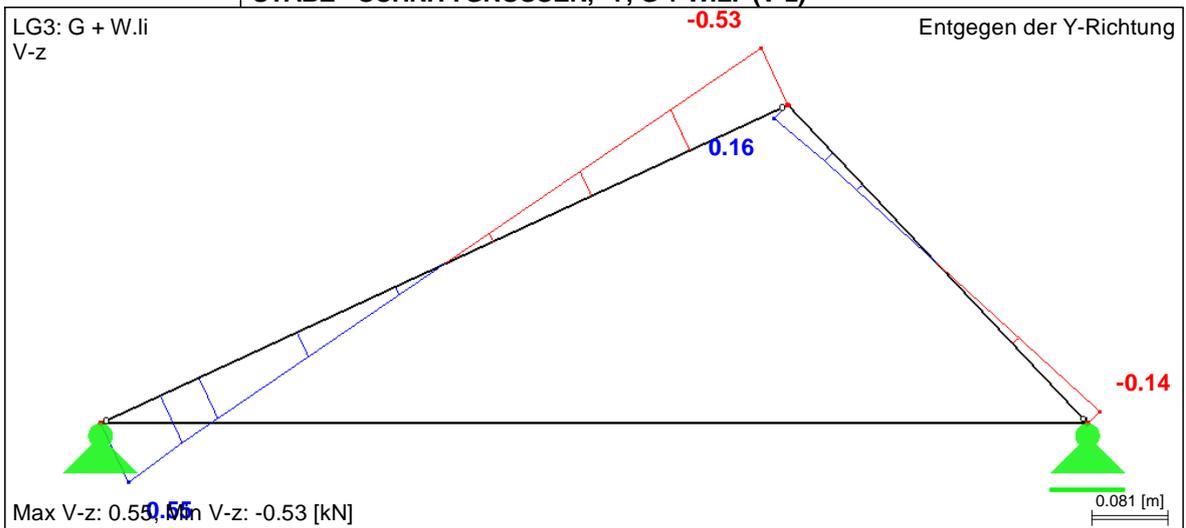
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S + W.RE (M-y)**



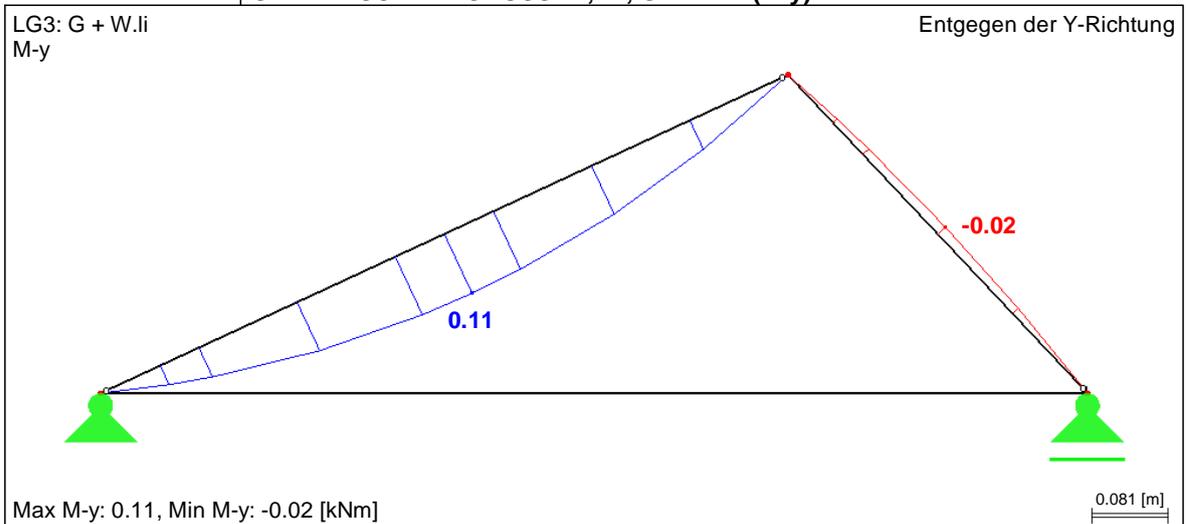
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + W.LI (N)**



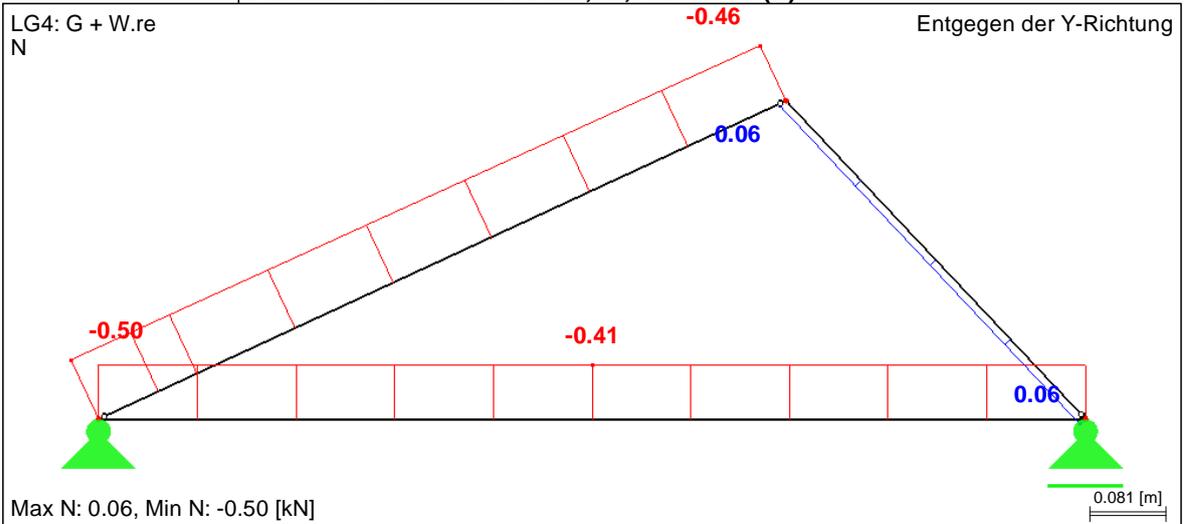
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + W.LI (V-z)**



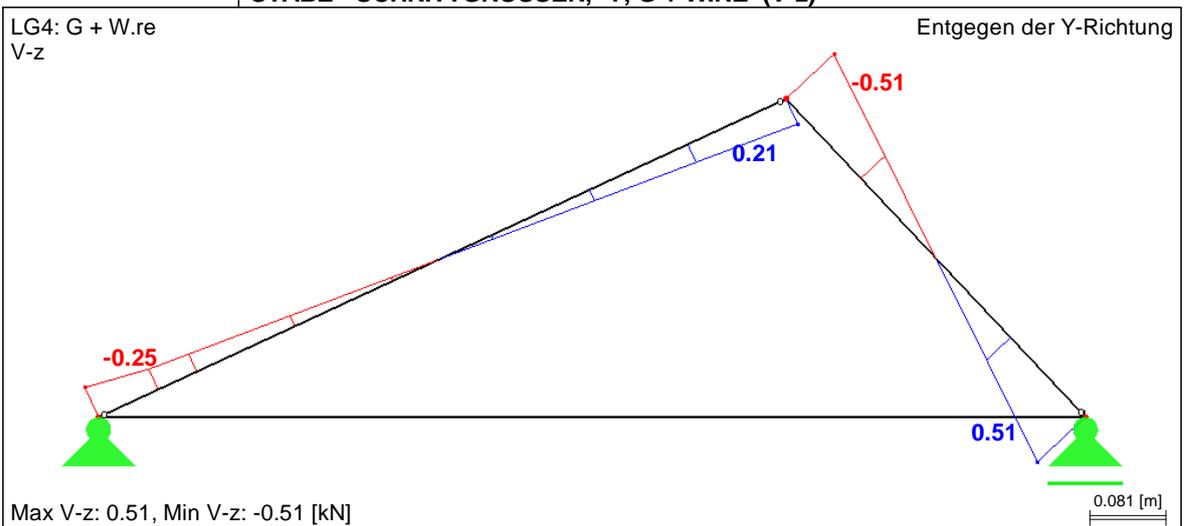
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + W.LI (M-y)**



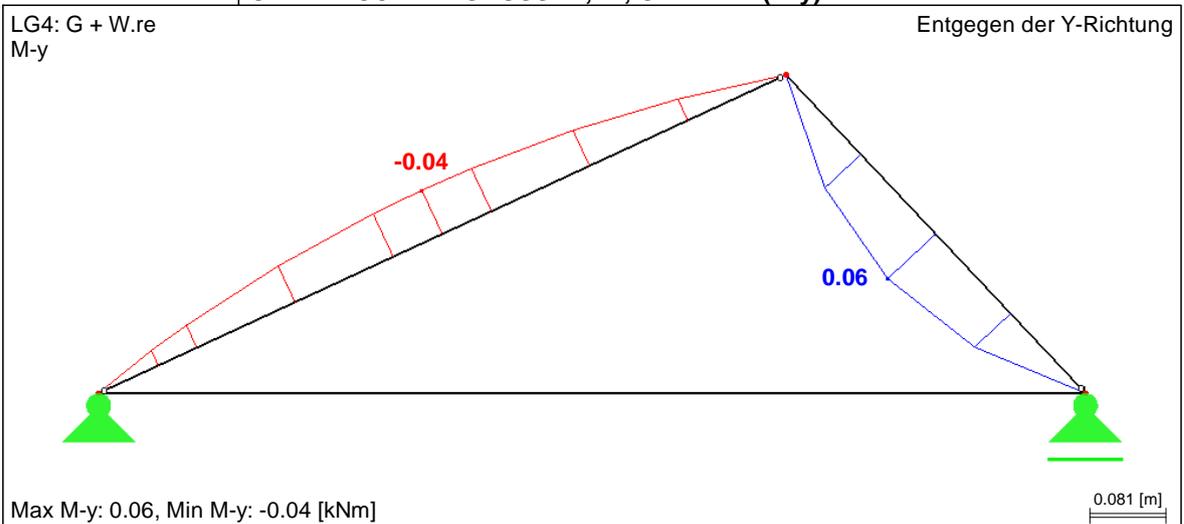
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + W.RE (N)**



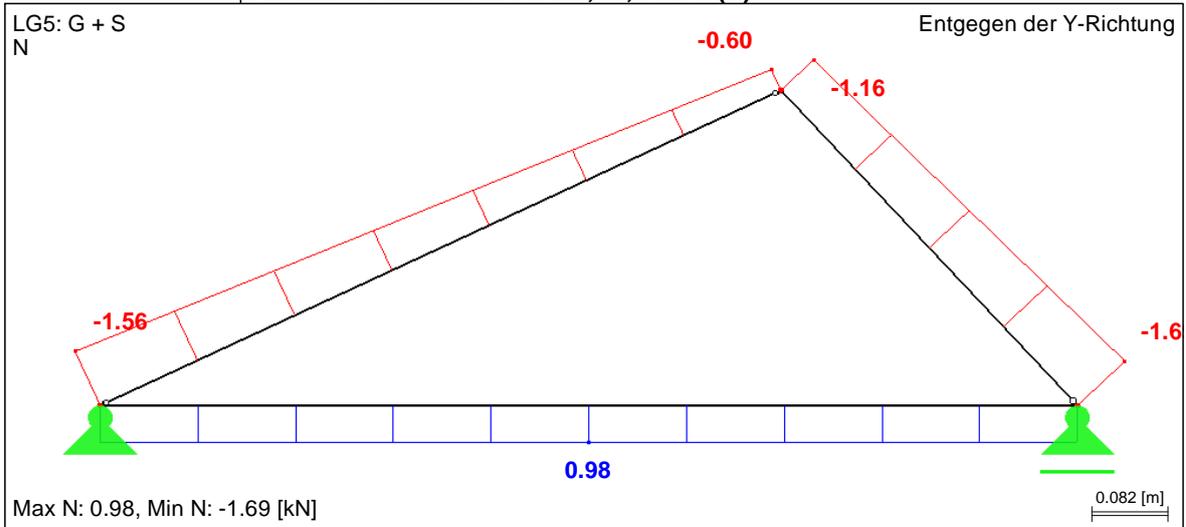
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + W.RE (V-z)**



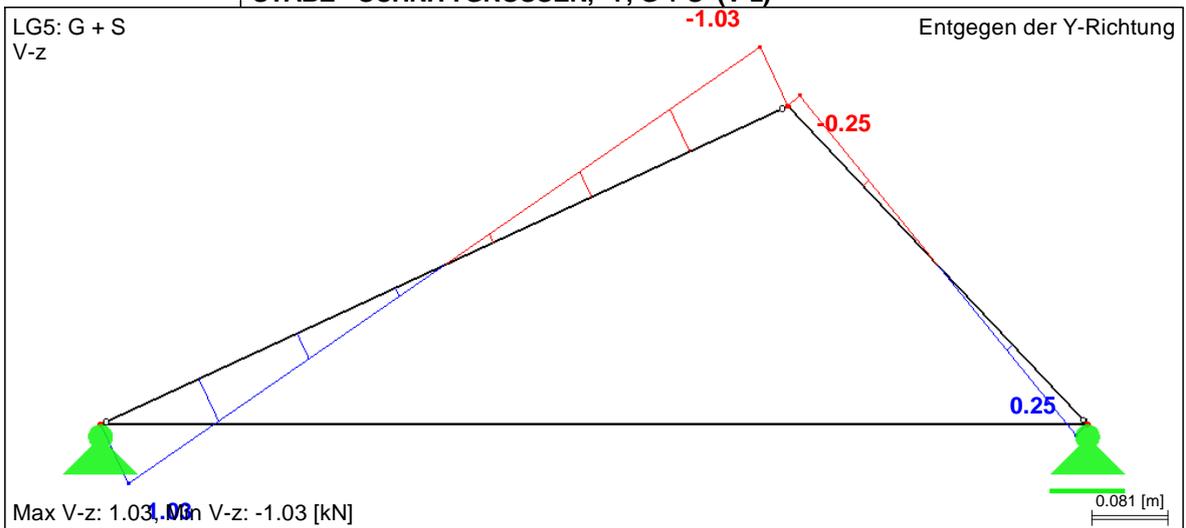
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + W.RE (M-y)**



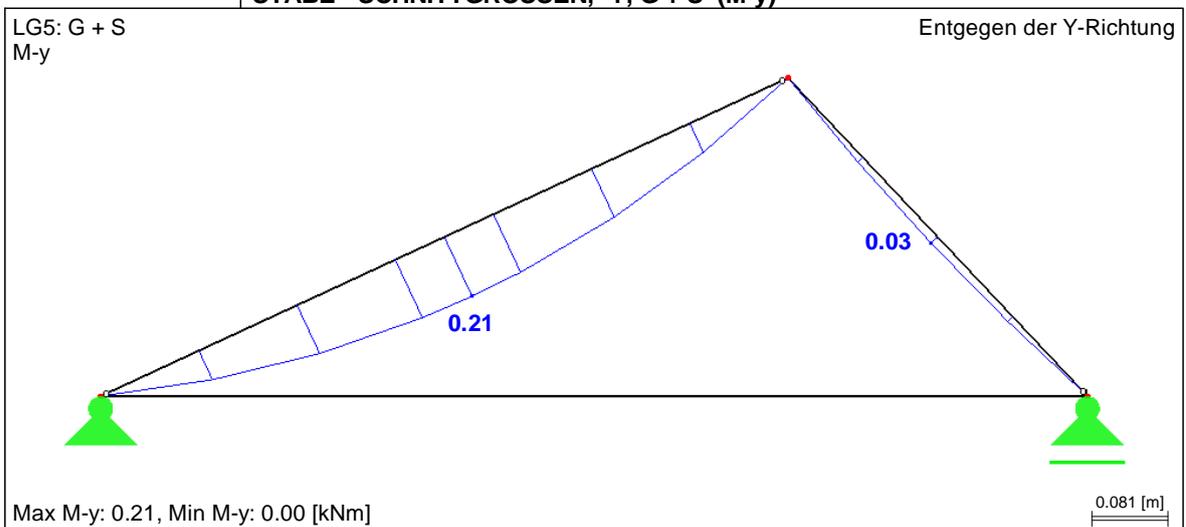
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S (N)**



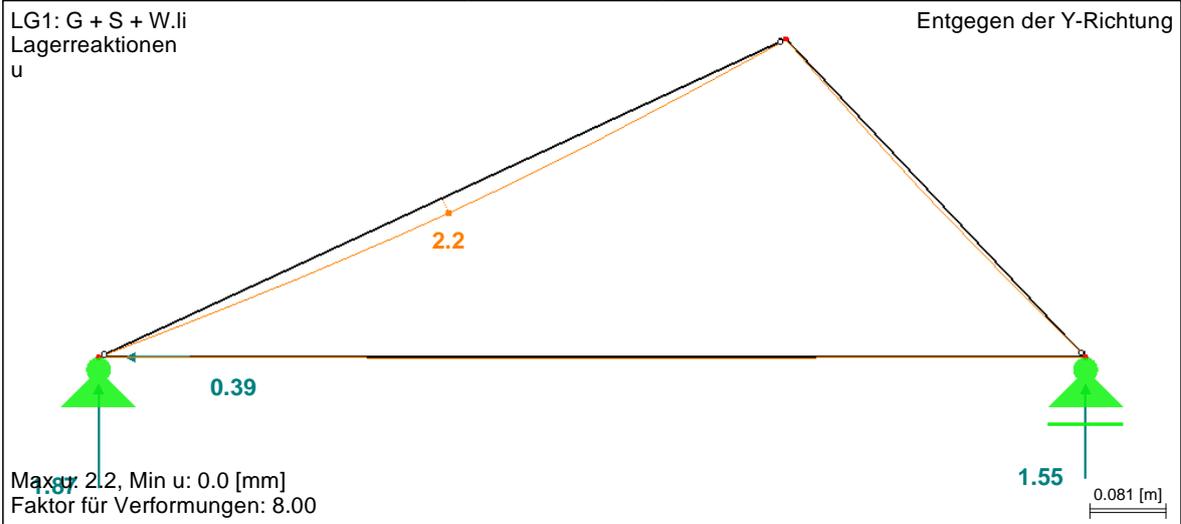
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S (V-z)**



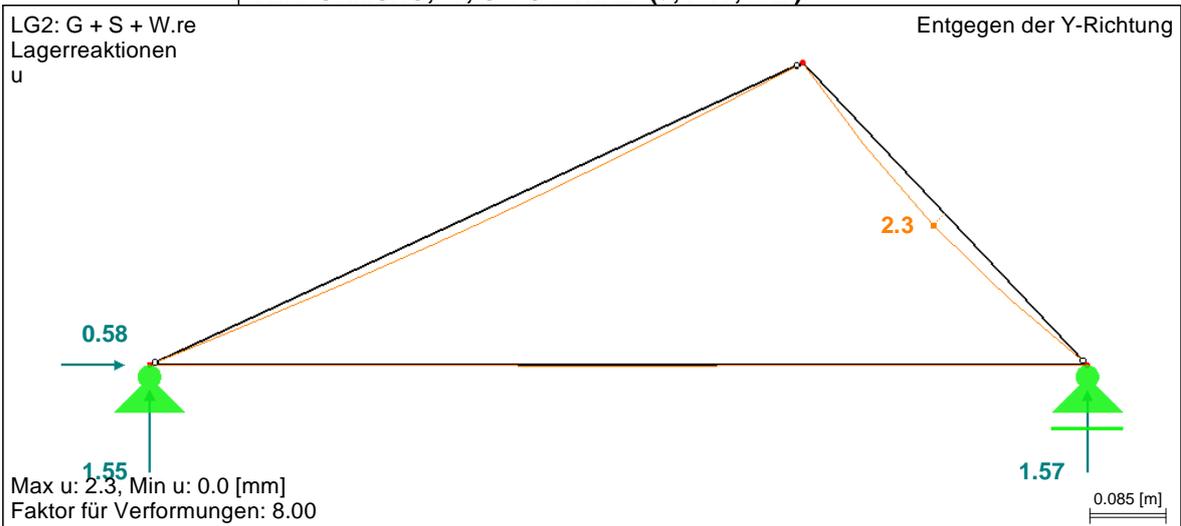
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S (M-y)**



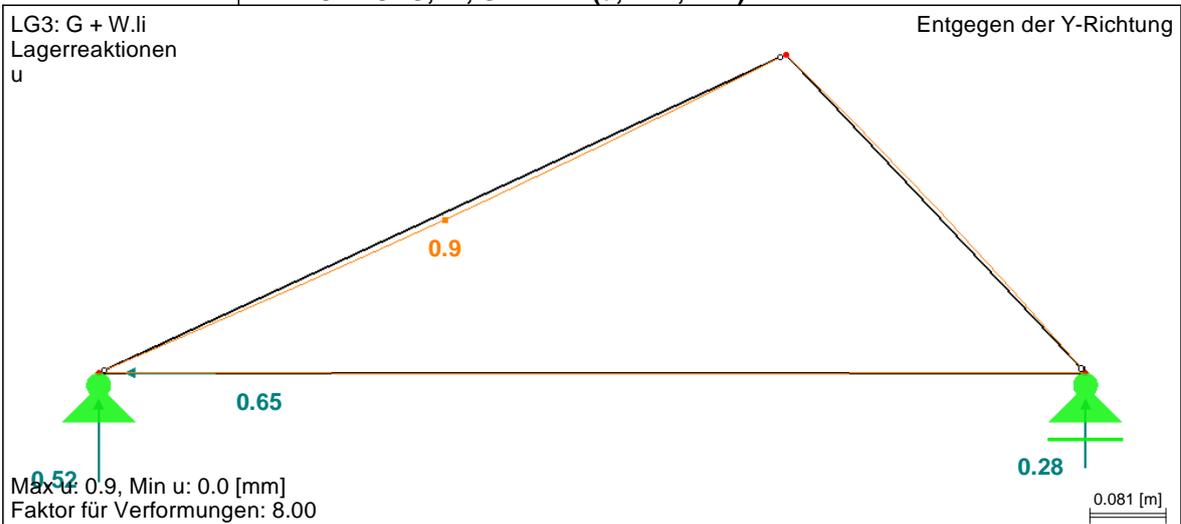
■ **VERFORMUNG, -Y, G + S + W.LI (u, P-X', P-Z')**



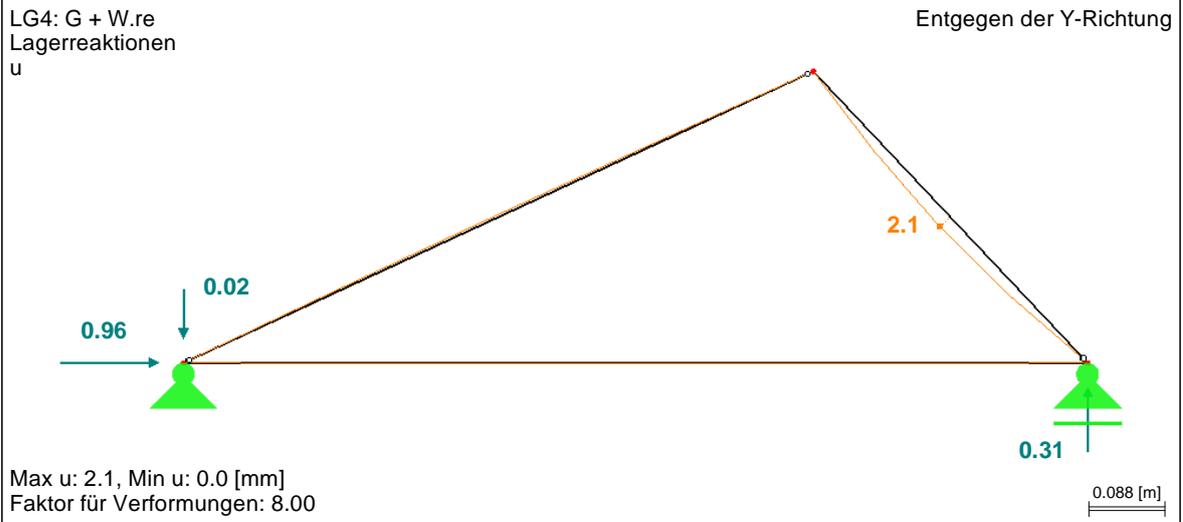
■ **VERFORMUNG, -Y, G + S + W.RE (u, P-X', P-Z')**



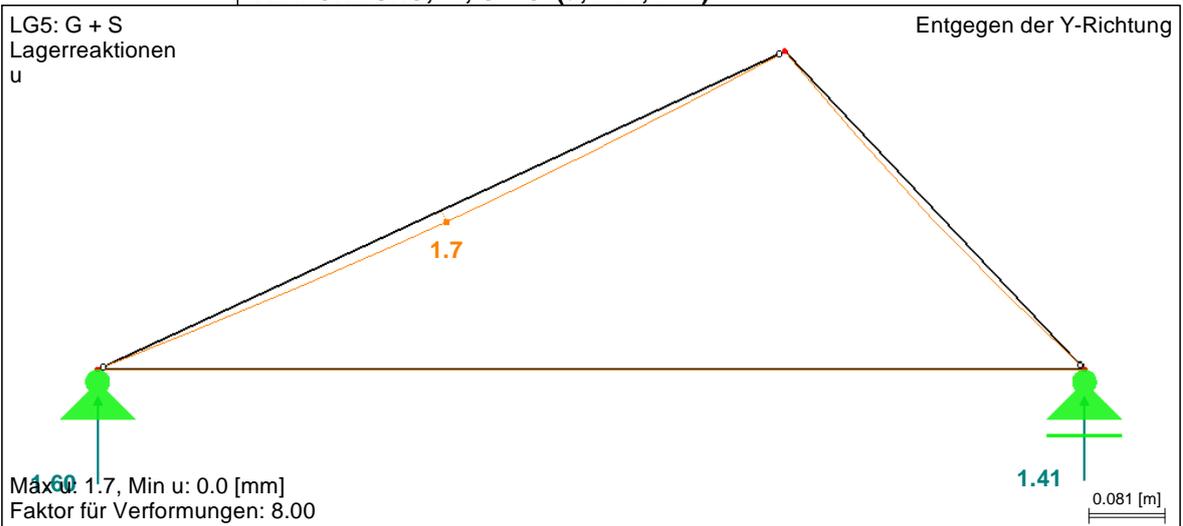
■ **VERFORMUNG, -Y, G + W.LI (u, P-X', P-Z')**



■ **VERFORMUNG, -Y, G + W.RE (u, P-X', P-Z')**



■ **VERFORMUNG, -Y, G + S (u, P-X', P-Z')**



■ BASISANGABEN

BERECHNUNGSART

- | | |
|--|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Statik | <input checked="" type="checkbox"/> Theorie I. Ordnung (lineare Berechnung) |
| <input type="checkbox"/> Nachweis | <input type="checkbox"/> Theorie II. Ordnung (nichtlinear nach Timoshenko) |
| <input type="checkbox"/> Dynamik | <input type="checkbox"/> Theorie großer Verschiebungen (nichtlinear nach Newton-Raphson) |
| | <input type="checkbox"/> Durchschlagproblem (nichtlinear nach Newton-Raphson) |
| <input checked="" type="checkbox"/> Lastfälle | <input type="checkbox"/> Bemessungsfälle |
| <input checked="" type="checkbox"/> LF-Gruppen | <input type="checkbox"/> Dynamikfälle |
| <input type="checkbox"/> LF-Kombinationen | <input type="checkbox"/> Knickfiguren |

STRUKTURKENNWERTE

- | | | |
|---|------------------|--------------------|
| <input type="checkbox"/> 1D-Durchlaufträger | 3 Knoten | 3 Stäbe |
| <input checked="" type="checkbox"/> 2D-Stabwerk | 1 Materialien | 0 Seilstäbe |
| <input type="checkbox"/> 3D-Stabwerk | 3 Querschnitte | 0 Voutenstäbe |
| <input type="checkbox"/> Trägerrost | 1 Stabendgelenke | 0 El. gebet. Stäbe |
| | 0 Stabteilungen | 0 Stabzüge |

■ KNOTEN

Knoten Nr.	Bezugs-Knoten	Koordinaten System	Knotenkoordinaten		Kommentar
			X [m]	Z [m]	
1	-	Kartesisch	0.000	0.000	
2	-	Kartesisch	-0.934	0.000	
3	-	Kartesisch	-0.700	0.404	

■ MATERIALIEN

Material Nr.	Material-Bezeichnung	Elast.-Modul E [kN/cm ²]	Schubmodul G [kN/cm ²]	Sp. Gewicht γ [kN/m ³]	Wärmedehnz. α [1/°C]	Beiwert γ_M [-]
1	Aluminium EN AW-6060 T66 (LF H) DIN 4113-1/A1: 2002-09	7000.00	2700.00	27.00	2.3000E-05	1.100

■ QUERSCHNITTE

Quers. Nr.	Querschnitts-Bezeichnung	Mater. Nr.	I _T [cm ⁴] A [cm ²]	I _y [cm ⁴] A _y [cm ²]	I _z [cm ⁴] A _z [cm ²]
1	DUENQ POS 01	1	2.40	1.69	0.47
2	DUENQ POS 02	1	2.59	0.91	0.38
3	RRO 50x30x2.6	1	3.83	12.30	2.24

■ STABENDGELENKE

Gelenk Nr.	Bezugs-system	Gelenk / Feder [kN/m], [kNm/rad]		
		N	V _z	M _y
1	Lokal x,y,z	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

■ STÄBE

Stab Nr.	Stabtyp	Knoten		Drehung Typ	Drehung β [°]	Querschnitt		Gelenk		Exz. Nr.	Teil. Nr.	Länge L [m]	
		Anfang	Ende			Anfang	Ende	Anfang	Ende				
1	Balkenstab	1	2	Winkel	0	1	1	-	-	-	-	0.934	X
2	Balkenstab	1	3	Winkel	0	3	3	1	1	-	-	0.808	XZ
3	Balkenstab	3	2	Winkel	0	2	2	-	1	-	-	0.467	XZ

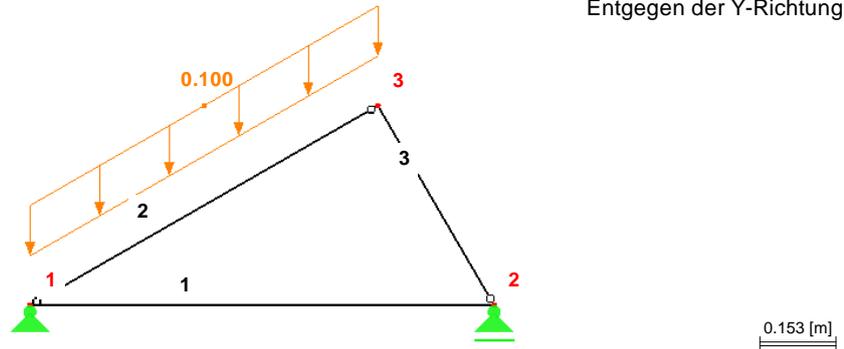
■ KNOTENLAGER

Lager Nr.	Knoten Nr.	Lagerdrehung [°] um Y	Lagerung bzw. Feder [kN/m] [kNm/rad]		
			u _x	u _z	ϕ_y
1	2	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	1	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

■ **BELASTUNG - EIGENGEWICHT, -Y**

LF1: Eigengewicht

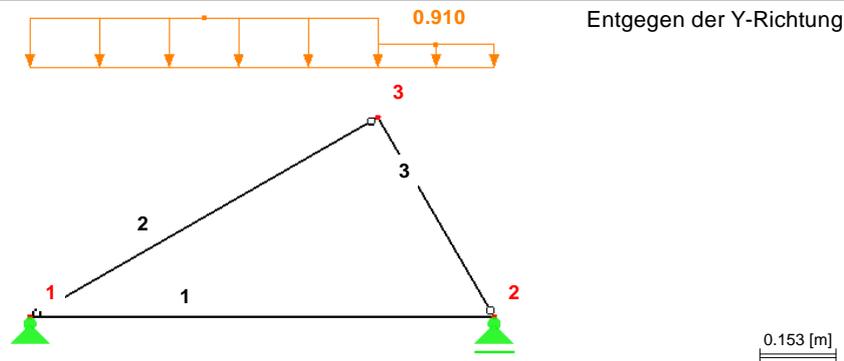
Entgegen der Y-Richtung



■ **BELASTUNG - SCHNEE, -Y**

LF2: Schnee

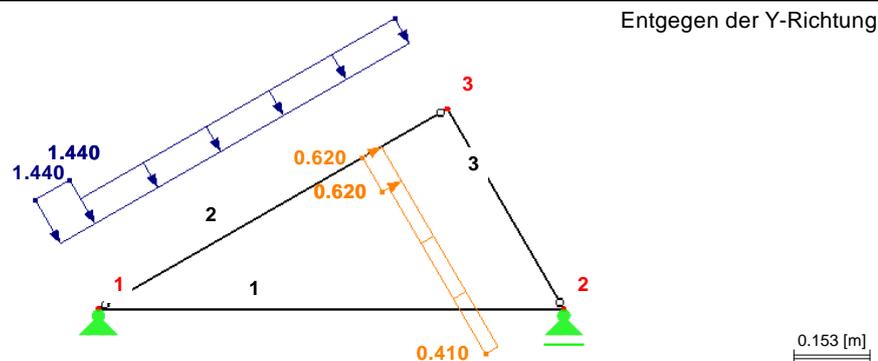
Entgegen der Y-Richtung



■ **BELASTUNG - WIND VON LINKS, -Y**

LF3: Wind von links

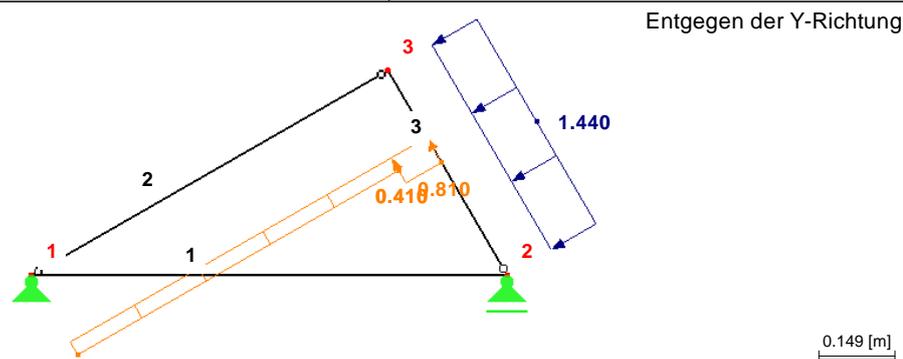
Entgegen der Y-Richtung



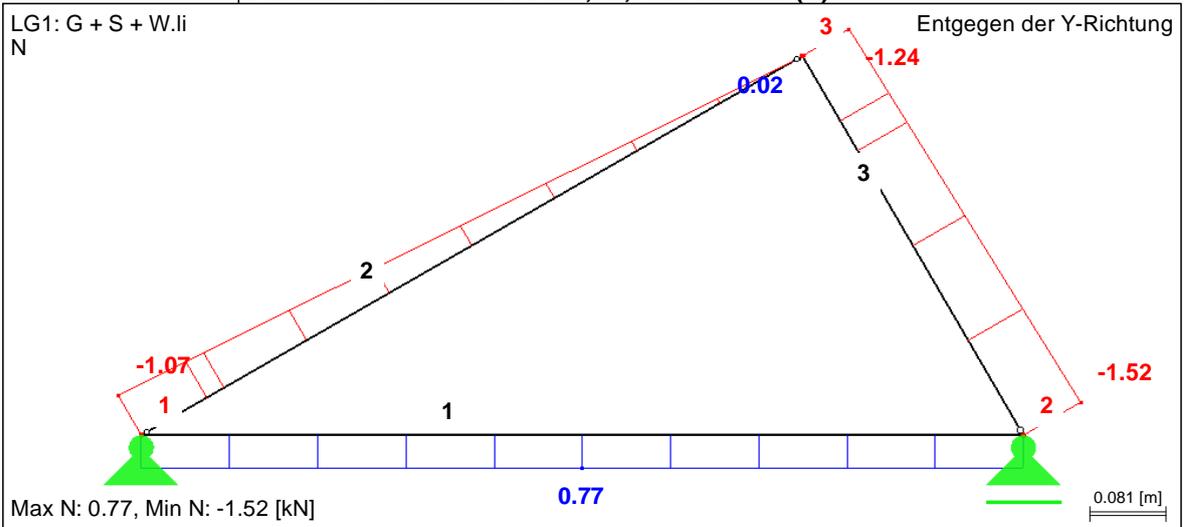
■ **BELASTUNG - WIND VON RECHTS, -Y**

LF4: Wind von rechts

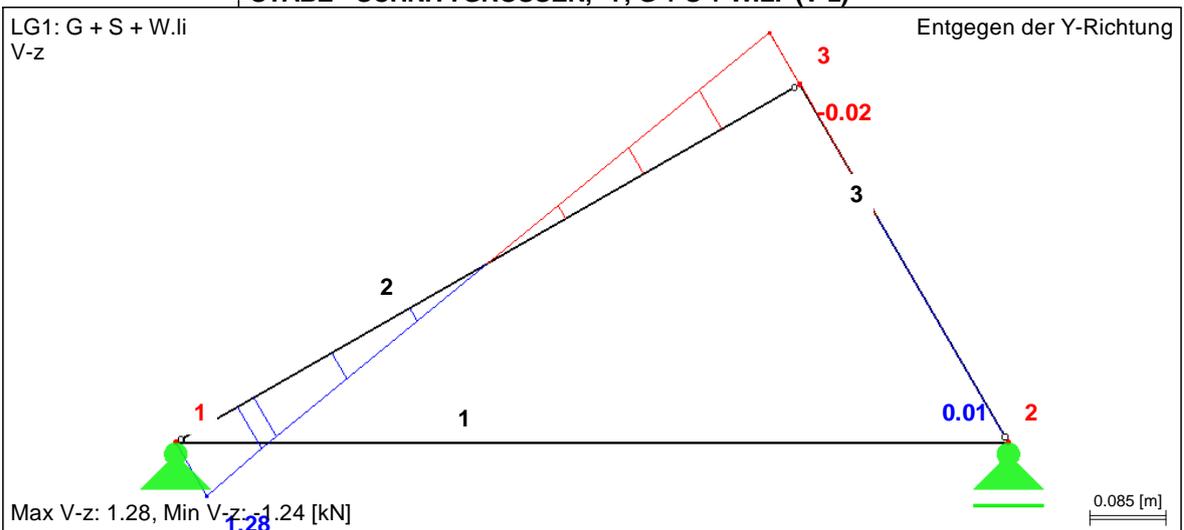
Entgegen der Y-Richtung



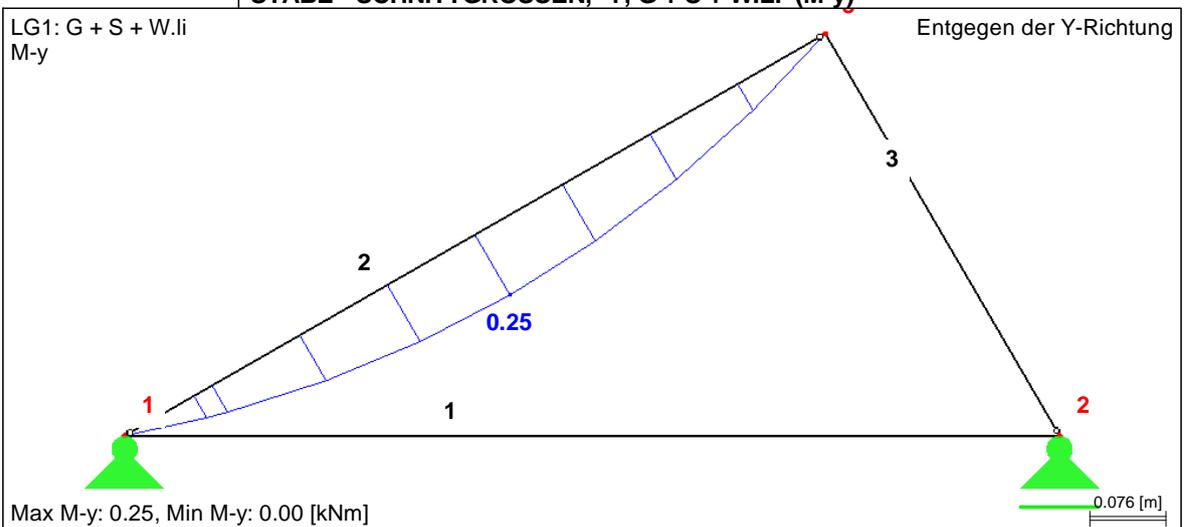
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S + W.LI (N)**



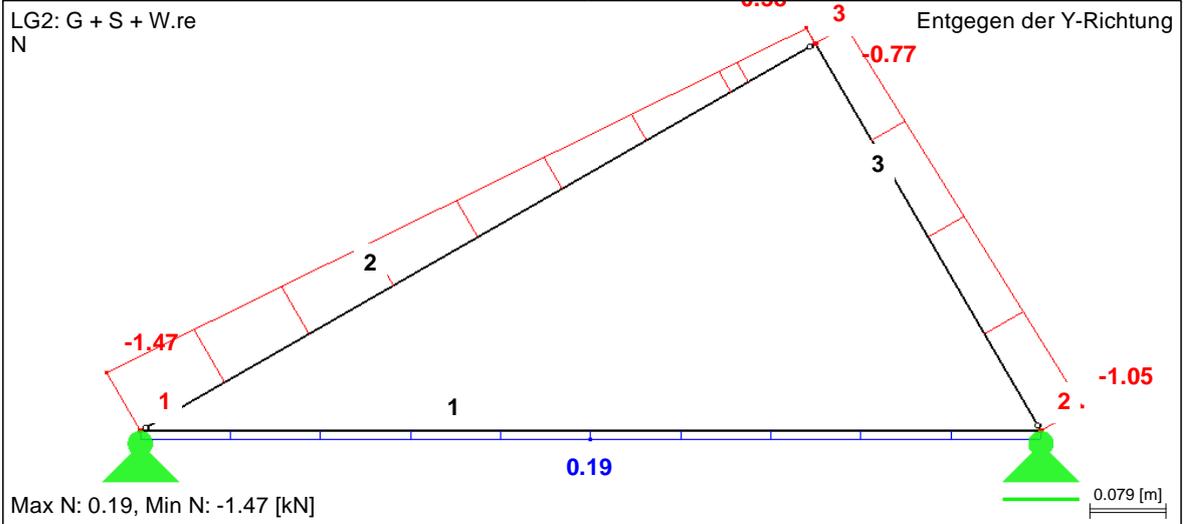
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S + W.LI (V-z)**



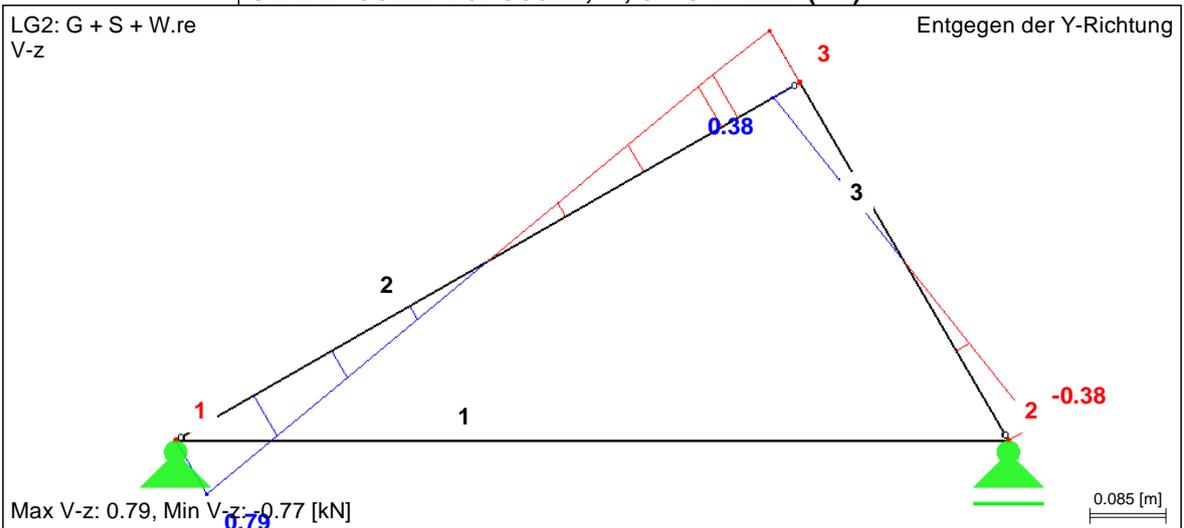
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S + W.LI (M-y)**



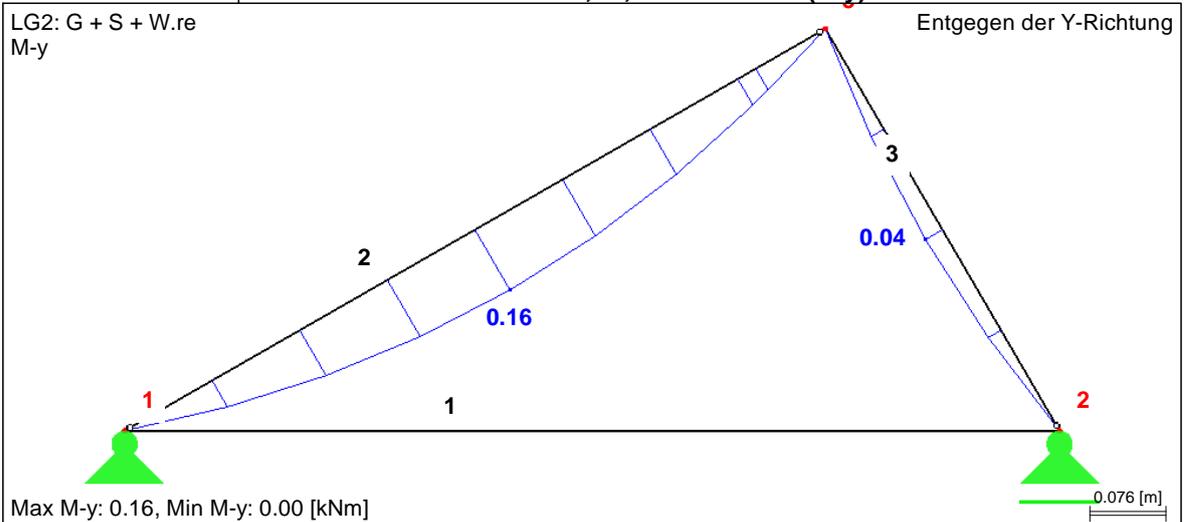
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S + W.RE (N)



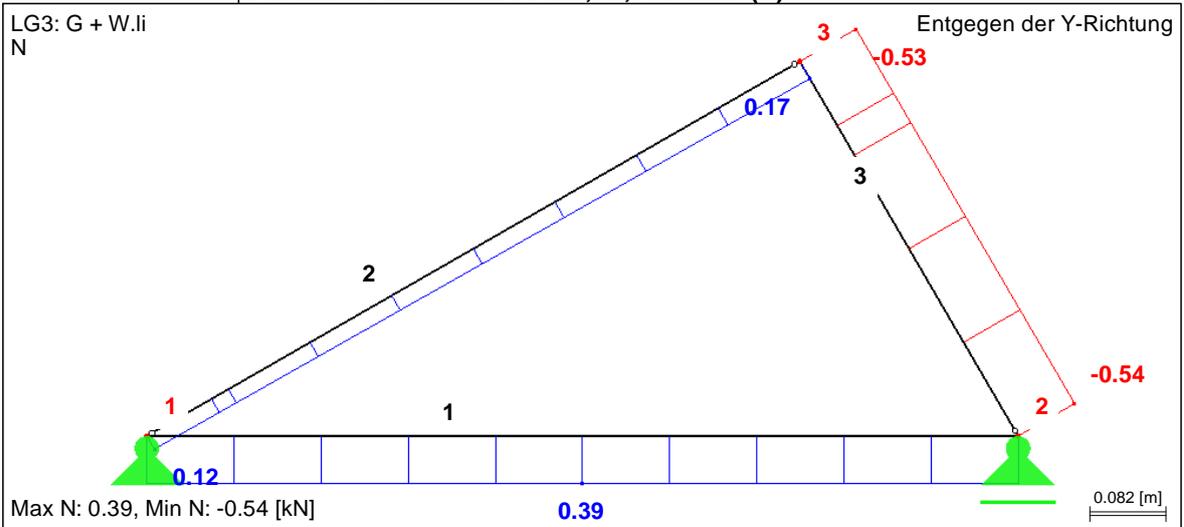
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S + W.RE (V-z)



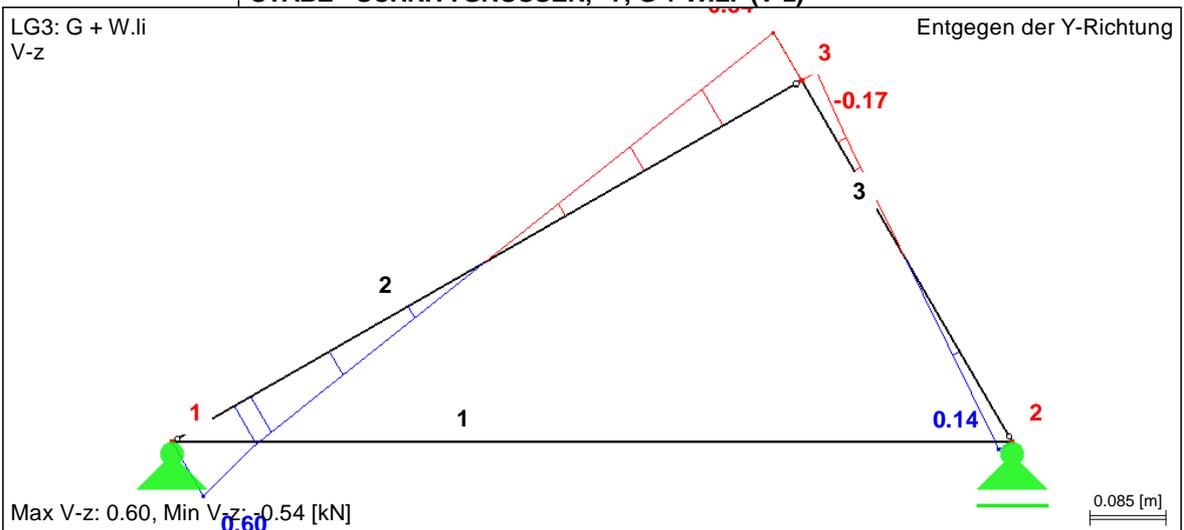
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S + W.RE (M-y)



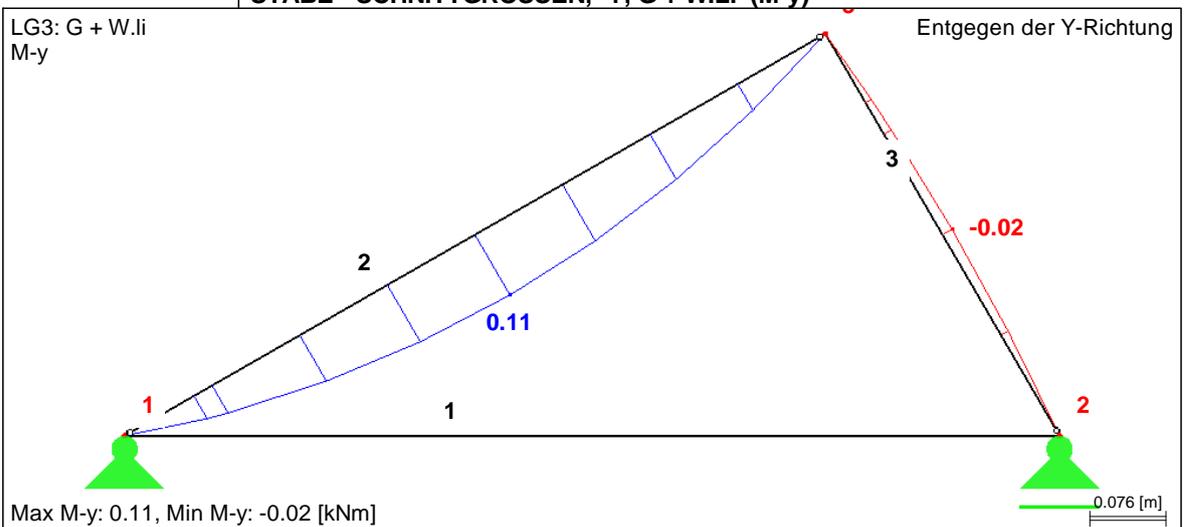
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + W.LI (N)



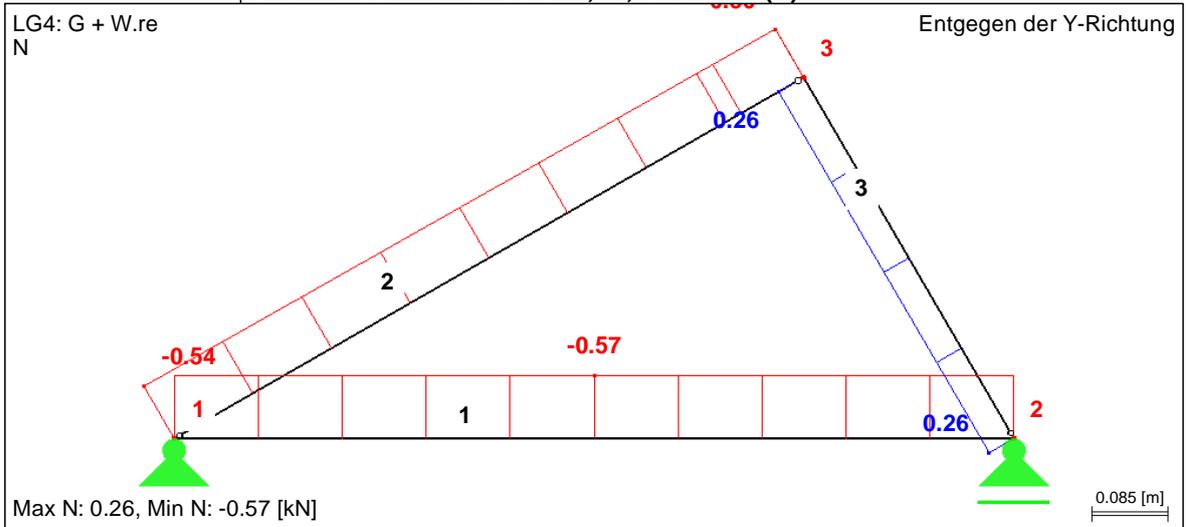
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + W.LI (V-z)



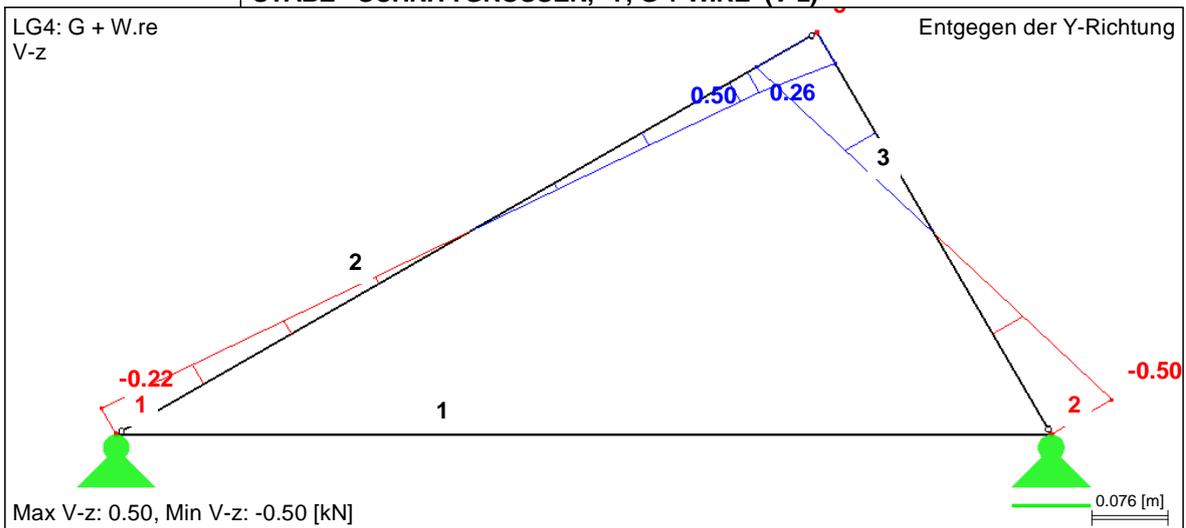
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + W.LI (M-y)



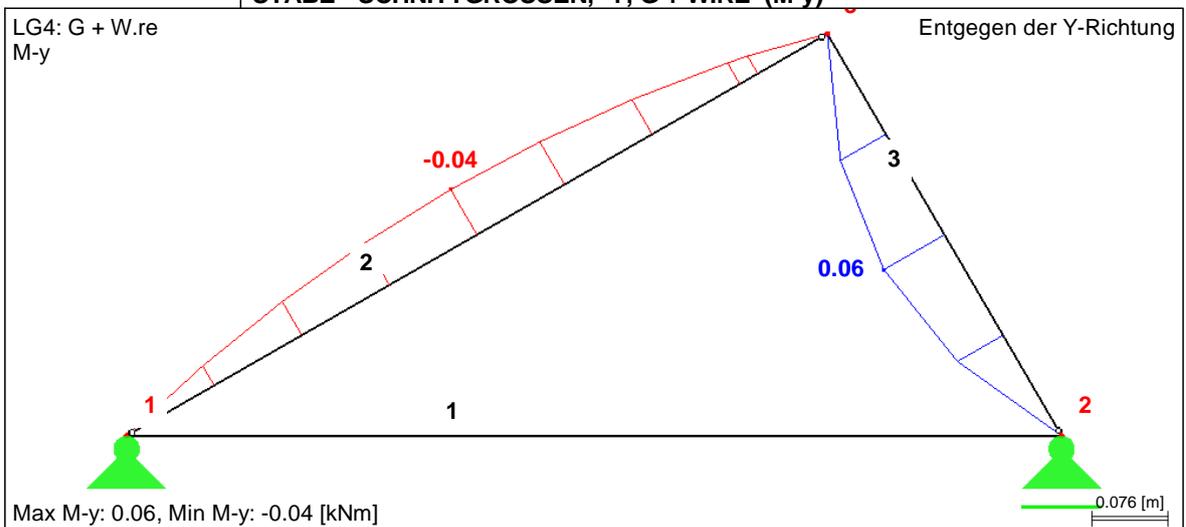
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + W.RE (N)**



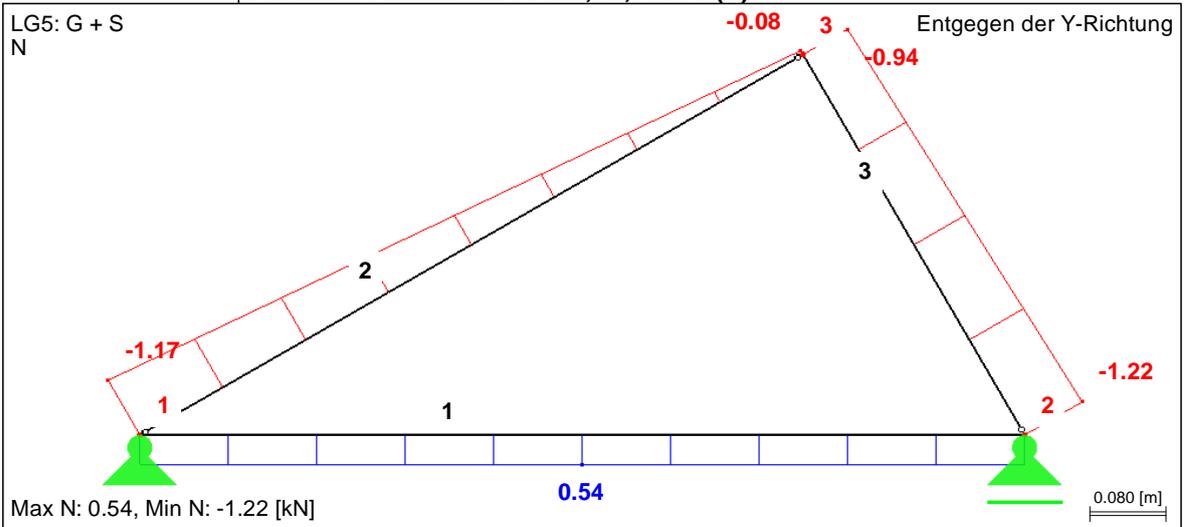
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + W.RE (V-z)**



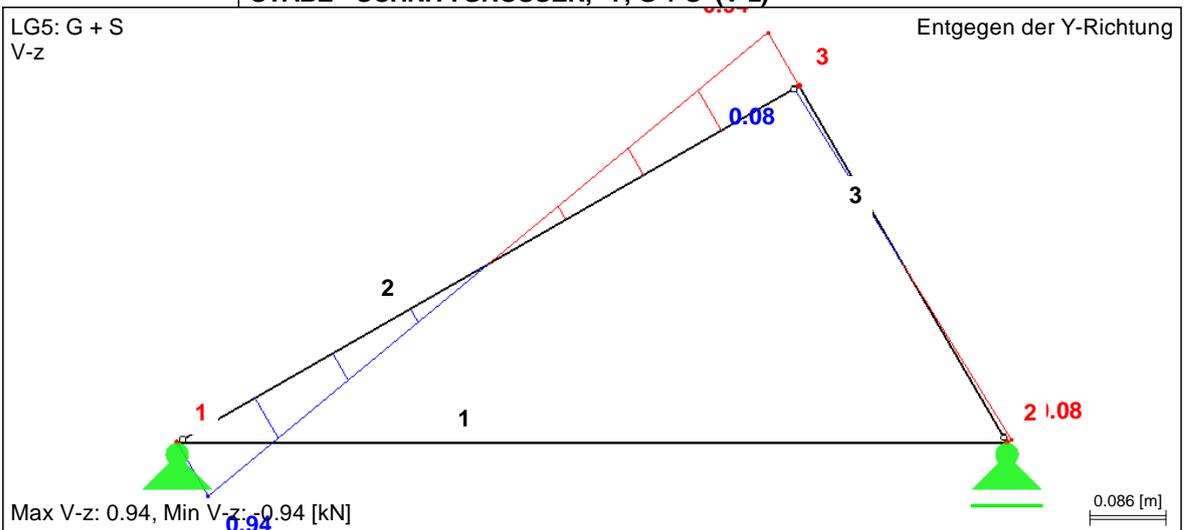
■ **STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + W.RE (M-y)**



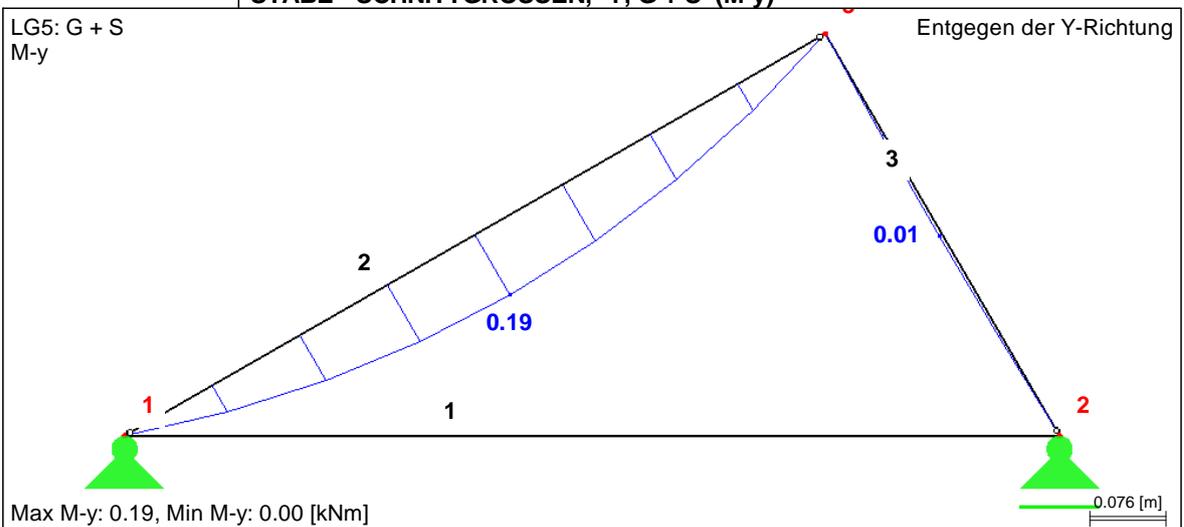
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S (N)



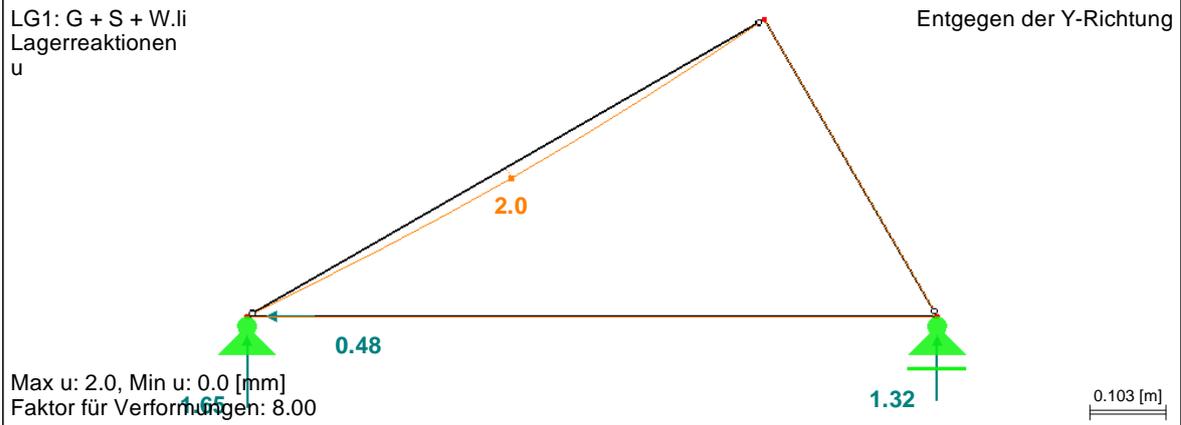
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S (V-z)



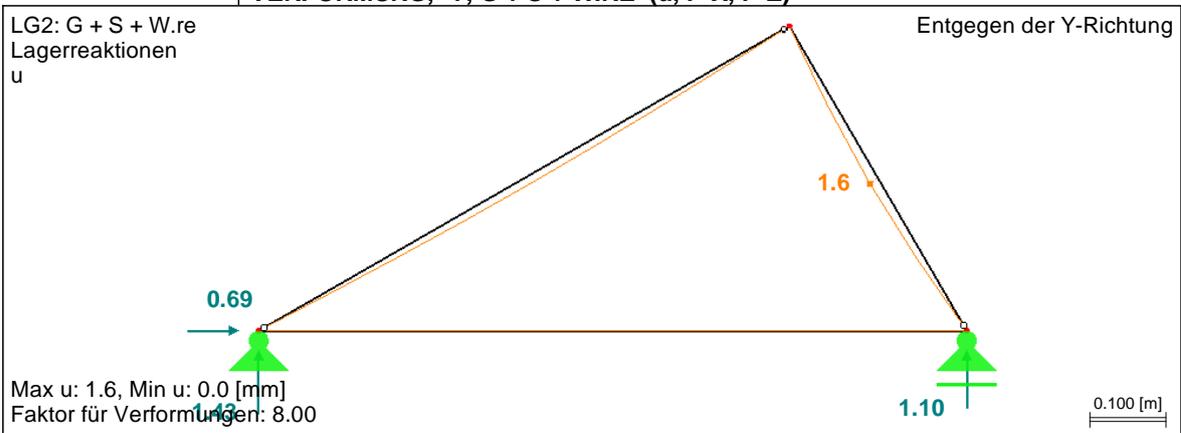
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S (M-y)



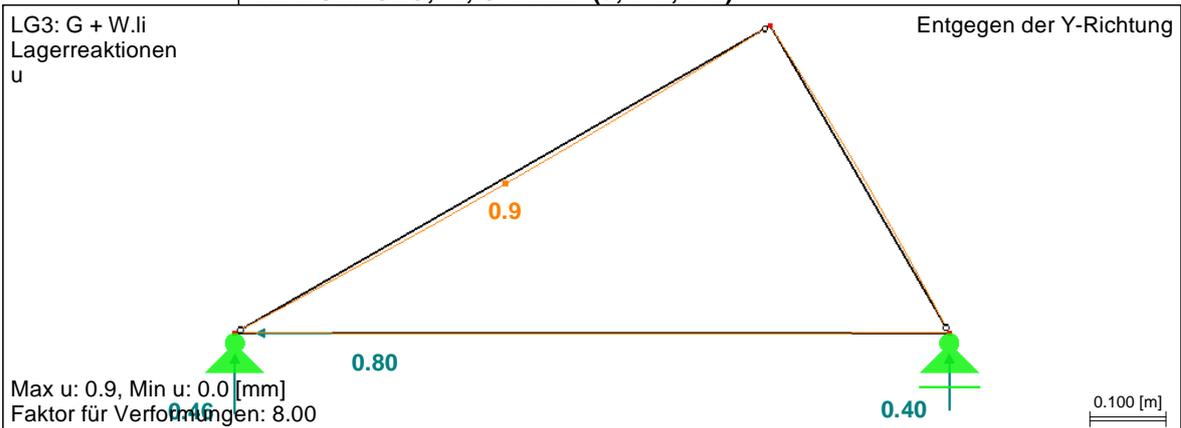
■ **VERFORMUNG, -Y, G + S + W.LI (u, P-X, P-Z)**



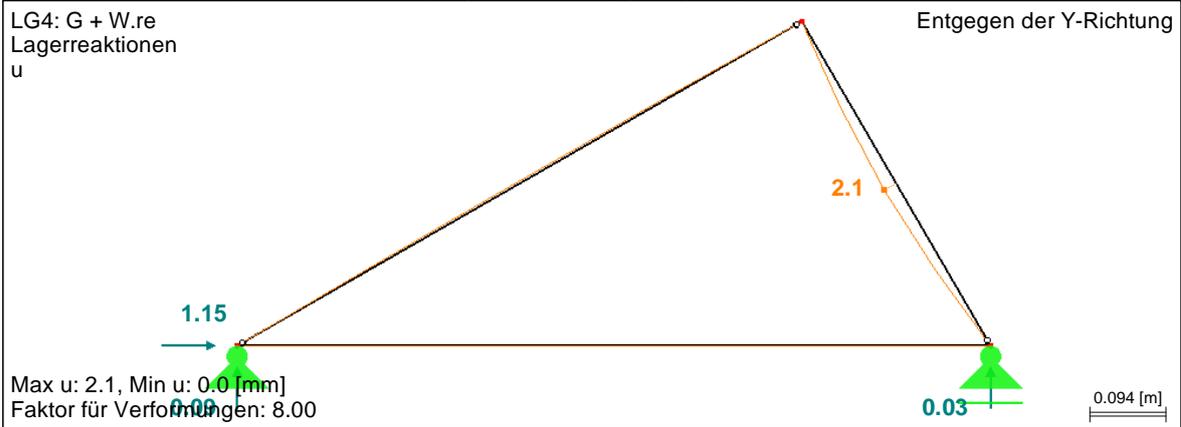
■ **VERFORMUNG, -Y, G + S + W.RE (u, P-X, P-Z)**



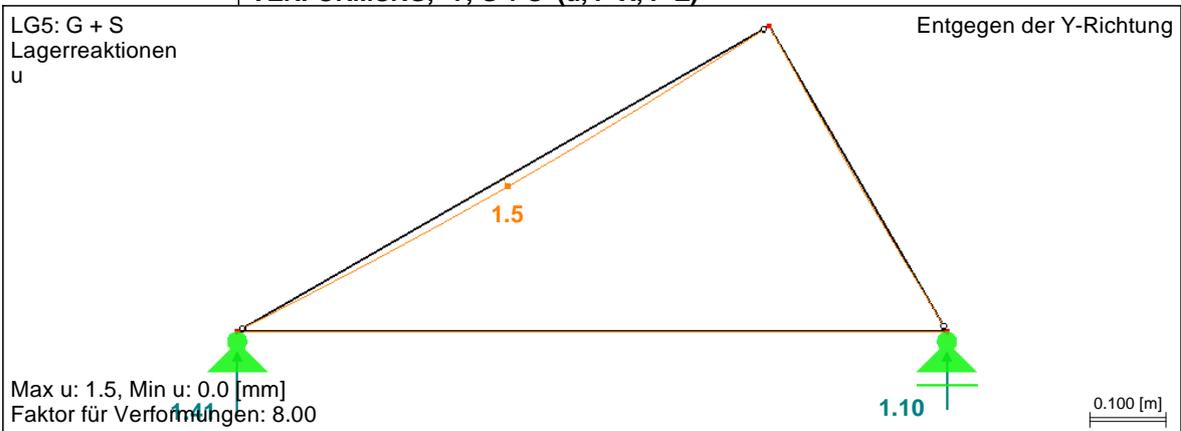
■ **VERFORMUNG, -Y, G + W.LI (u, P-X, P-Z)**



■ **VERFORMUNG, -Y, G + W.RE (u, P-X, P-Z)**



■ **VERFORMUNG, -Y, G + S (u, P-X, P-Z)**



■ **BASISANGABEN**

BERECHNUNGSART

- | | |
|--|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Statik | <input checked="" type="checkbox"/> Theorie I. Ordnung (lineare Berechnung) |
| <input type="checkbox"/> Nachweis | <input type="checkbox"/> Theorie II. Ordnung (nichtlinear nach Timoshenko) |
| <input type="checkbox"/> Dynamik | <input type="checkbox"/> Theorie großer Verschiebungen (nichtlinear nach Newton-Raphson) |
| | <input type="checkbox"/> Durchschlagproblem (nichtlinear nach Newton-Raphson) |
| <input checked="" type="checkbox"/> Lastfälle | <input type="checkbox"/> Bemessungsfälle |
| <input checked="" type="checkbox"/> LF-Gruppen | <input type="checkbox"/> Dynamikfälle |
| <input type="checkbox"/> LF-Kombinationen | <input type="checkbox"/> Knickfiguren |

STRUKTURKENNWERTE

- | | | |
|---|------------------|--------------------|
| <input type="checkbox"/> 1D-Durchlaufträger | 12 Knoten | 15 Stäbe |
| <input checked="" type="checkbox"/> 2D-Stabwerk | 1 Materialien | 0 Seilstäbe |
| <input type="checkbox"/> 3D-Stabwerk | 3 Querschnitte | 0 Voutenstäbe |
| <input type="checkbox"/> Trägerrost | 5 Stabendgelenke | 0 El. gebet. Stäbe |
| | 0 Stabteilungen | 0 Stabzüge |

■ **MATERIALIEN**

Material Nr.	Material-Bezeichnung	Elast.-Modul E [kN/cm ²]	Schubmodul G [kN/cm ²]	Sp. Gewicht γ [kN/m ³]	Wärmedehnz. α [1/°C]	Beiwert γ_M [-]
1	Aluminium EN AW-6060 T66 (LF H) DIN 4113-1/A1: 2002-09	7000.00	2700.00	27.00	2.3000E-05	1.100

■ **QUERSCHNITTE**

Quers. Nr.	Querschnitts-Bezeichnung	Mater. Nr.	I_T [cm ⁴] A [cm ²]	I_y [cm ⁴] A_y [cm ²]	I_z [cm ⁴] A_z [cm ²]
1	DUENQ POS 02	1	2.59	0.91	0.38
2	DUENQ POS 01	1	2.40	1.69	0.47
3	RRO 50x30x2.6	1	3.83	12.30	2.24

■ **STABENDGELENKE**

Gelenk Nr.	Bezugs-system	Gelenk / Feder [kN/m], [kNm/rad]		
		N	V _z	M _y
1	Lokal x,y,z	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Lokal x,y,z	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Lokal x,y,z	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Lokal x,y,z	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Lokal x,y,z	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

■ **STÄBE**

Stab Nr.	Stabtyp	Knoten		Drehung		Querschnitt		Gelenk		Exz. Nr.	Teil. Nr.	Länge L [m]	
		Anfang	Ende	Typ	β [°]	Anfang	Ende	Anfang	Ende				
1	Balkenstab	1	2	Winkel	0	2	2	-	-	-	-	0.934	X
2	Balkenstab	1	3	Winkel	0	1	1	1	1	-	-	0.808	XZ
3	Balkenstab	3	2	Winkel	0	1	1	-	1	-	-	0.467	XZ
4	Balkenstab	4	5	Winkel	0	2	2	-	-	-	-	0.934	X
5	Balkenstab	4	6	Winkel	0	3	3	3	3	-	-	0.808	XZ
6	Balkenstab	6	5	Winkel	0	1	1	-	3	-	-	0.467	XZ
7	Balkenstab	7	8	Winkel	0	2	2	-	-	-	-	0.934	X
8	Balkenstab	7	9	Winkel	0	3	3	4	4	-	-	0.808	XZ
9	Balkenstab	9	8	Winkel	0	1	1	-	4	-	-	0.467	XZ
10	Balkenstab	10	11	Winkel	0	2	2	-	-	-	-	0.934	X
11	Balkenstab	10	12	Winkel	0	3	3	5	5	-	-	0.808	XZ
12	Balkenstab	12	11	Winkel	0	1	1	-	5	-	-	0.467	XZ
13	Balkenstab	2	4	Winkel	180	1	1	1	1	-	-	1.410	X
14	Balkenstab	5	7	Winkel	180	1	1	1	1	-	-	1.410	X
15	Balkenstab	8	10	Winkel	180	1	1	1	1	-	-	1.410	X

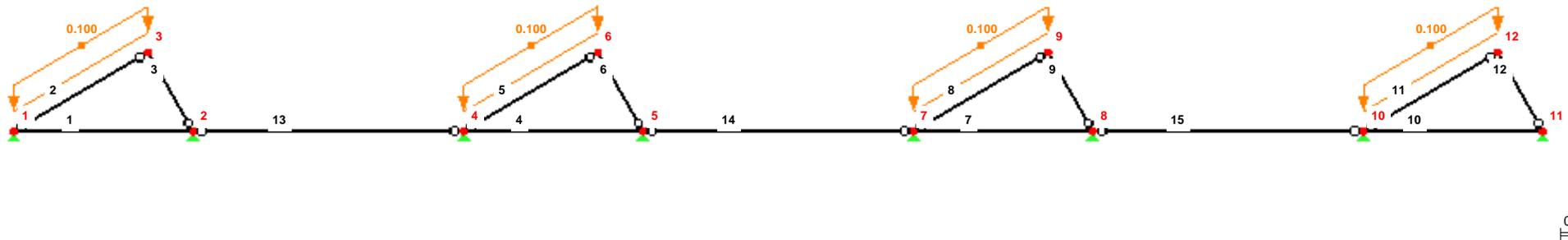
■ **KNOTENLAGER**

Lager Nr.	Knoten Nr.	Lagerdrehung [°] um Y	Lagerung bzw. Feder [kN/m] [kNm/rad]		
			u _x	u _z	φ _y
1	2,4,5,7,8,10,11	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	1	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

■ **BELASTUNG - EIGENGEWICHT, -Y**

LF1: Eigengewicht

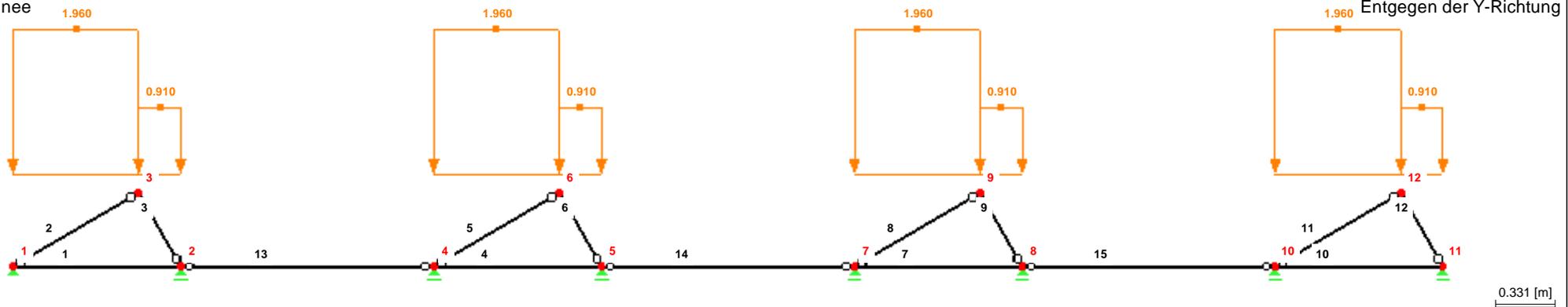
Entgegen der Y-Richtung



■ **BELASTUNG - SCHNEE, -Y**

LF2: Schnee

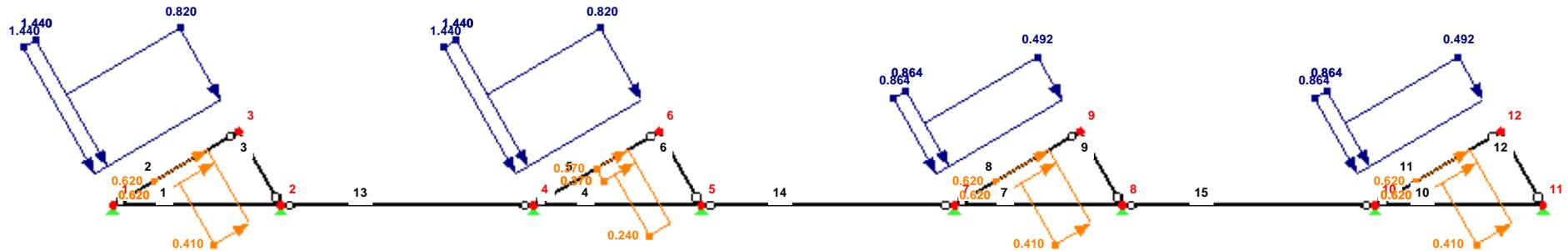
Entgegen der Y-Richtung



■ **BELASTUNG - WIND VON LINKS, -Y**

LF3: Wind von links

Entgegen der Y-Richtung

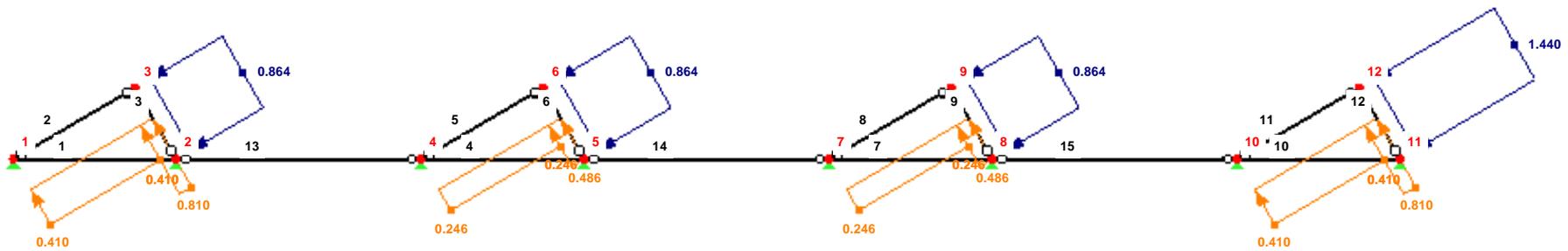


0.350 [m]

■ **BELASTUNG - WIND VON RECHTS, -Y**

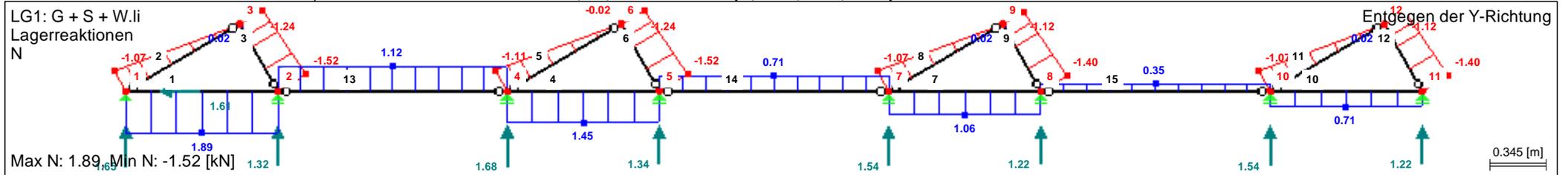
LF4: Wind von rechts

Entgegen der Y-Richtung

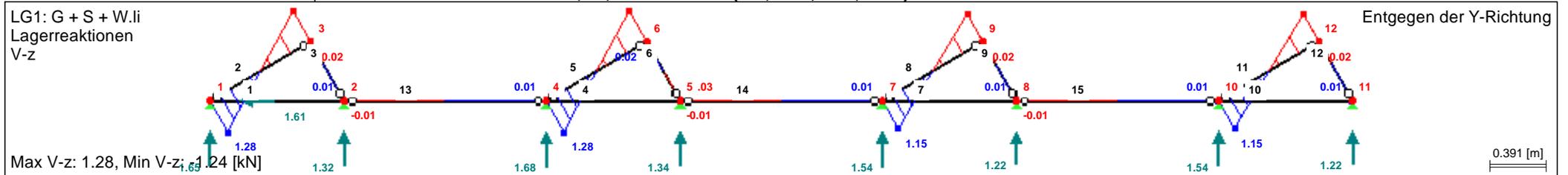


0.380 [m]

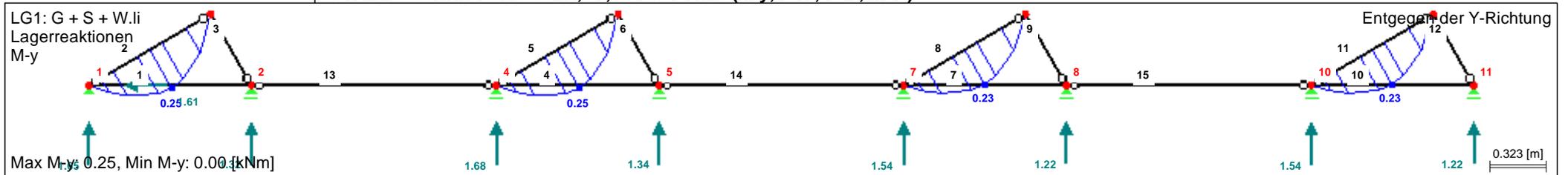
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S + W.LI (N, P-X', P-Z', M-Y')



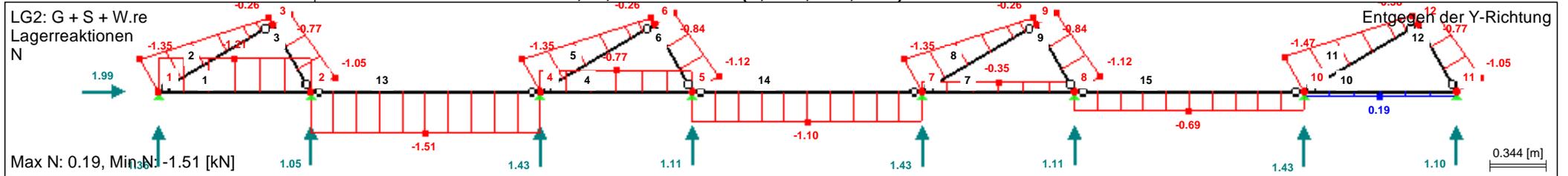
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S + W.LI (V-z, P-X', P-Z', M-Y')



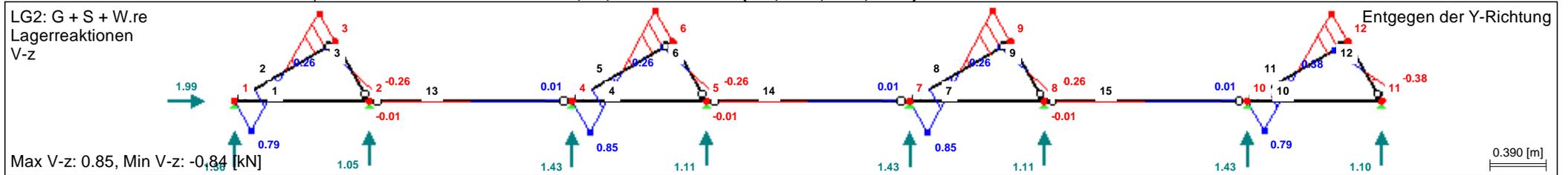
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S + W.LI (M-y, P-X', P-Z', M-Y')



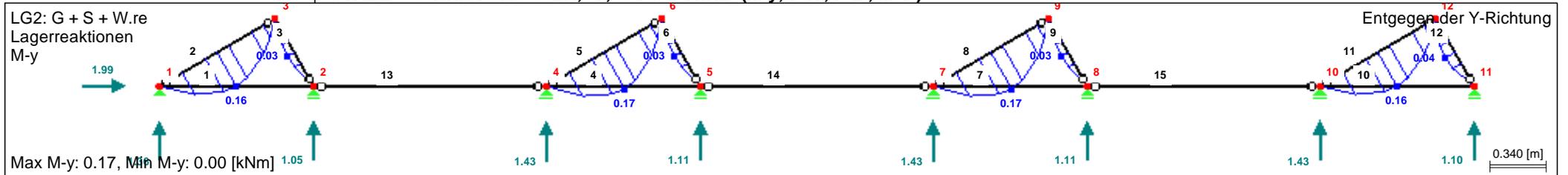
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S + W.RE (N, P-X', P-Z', M-Y')



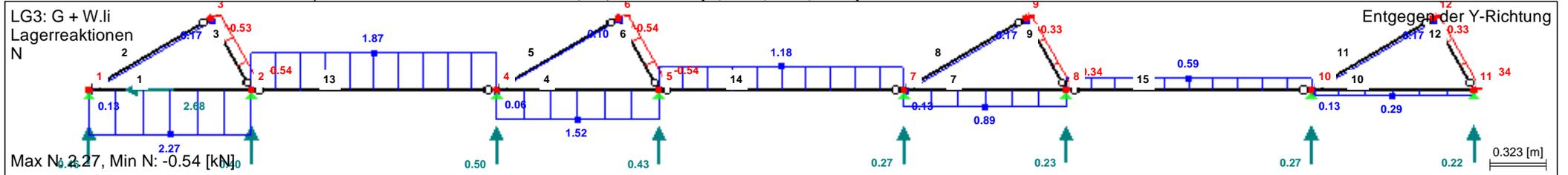
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S + W.RE (V-z, P-X', P-Z', M-Y')



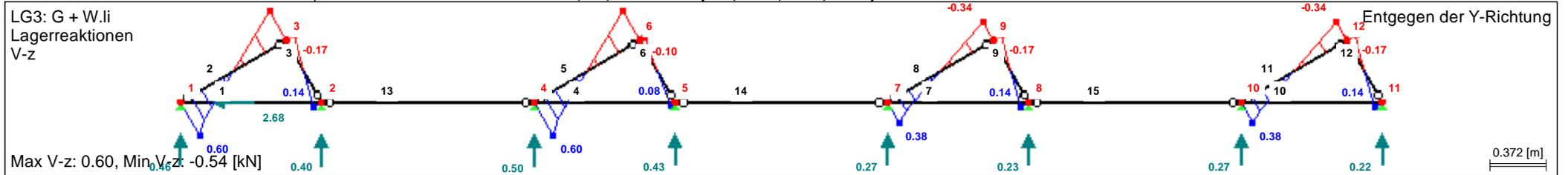
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S + W.RE (M-y, P-X', P-Z', M-Y')



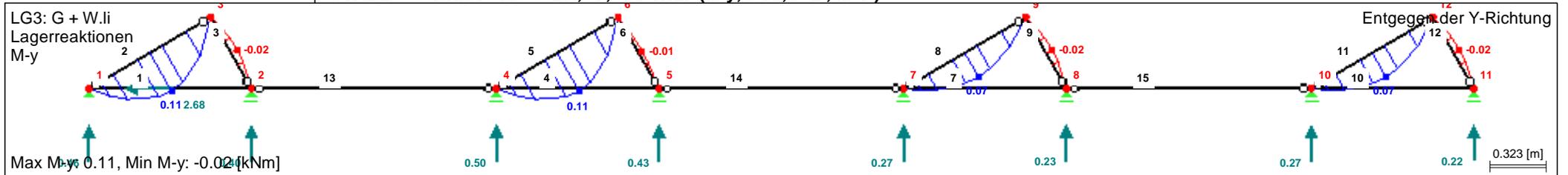
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + W.LI (N, P-X', P-Z', M-Y')



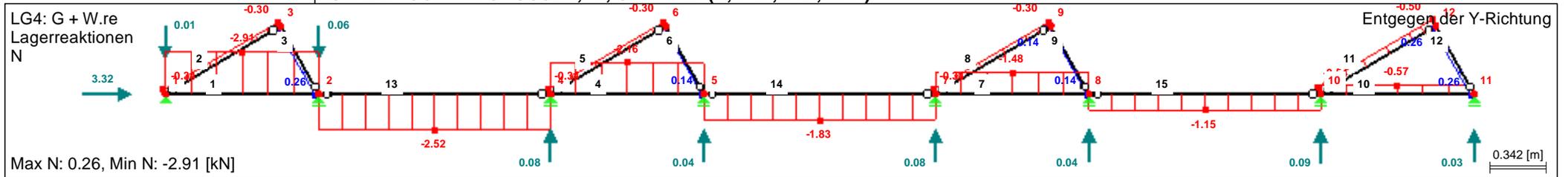
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + W.LI (V-z, P-X', P-Z', M-Y')



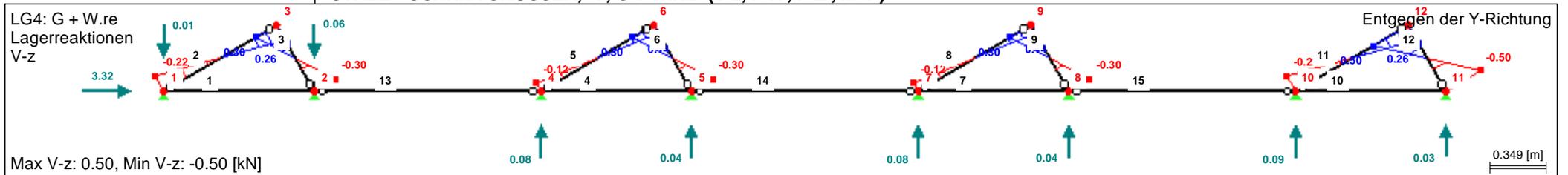
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + W.LI (M-y, P-X', P-Z', M-Y')



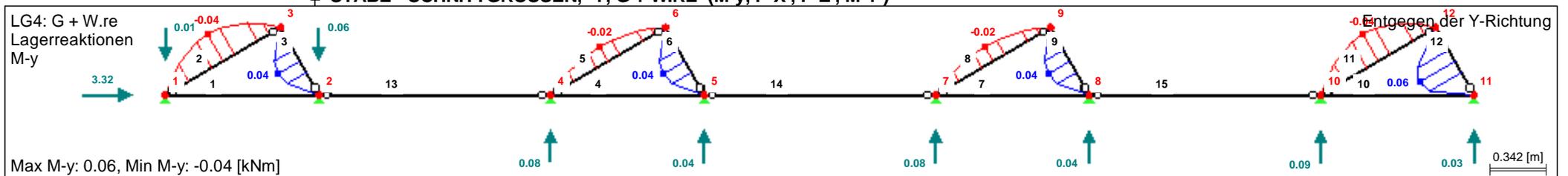
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + W.RE (N, P-X', P-Z', M-Y')



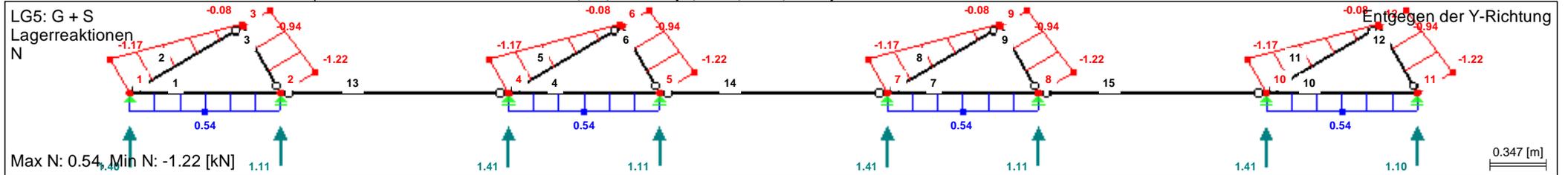
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + W.RE (V-z, P-X', P-Z', M-Y')



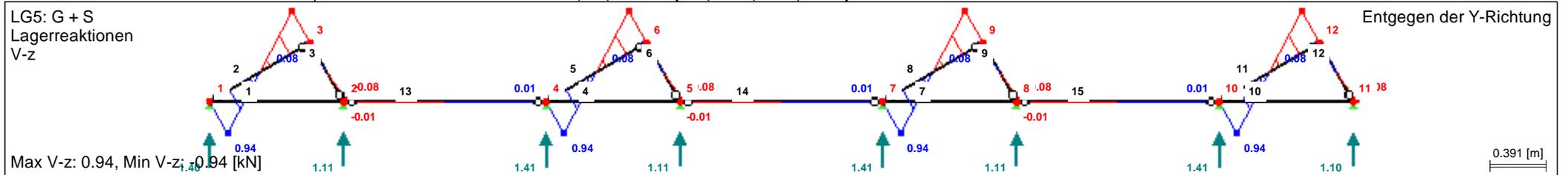
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + W.RE (M-y, P-X', P-Z', M-Y')



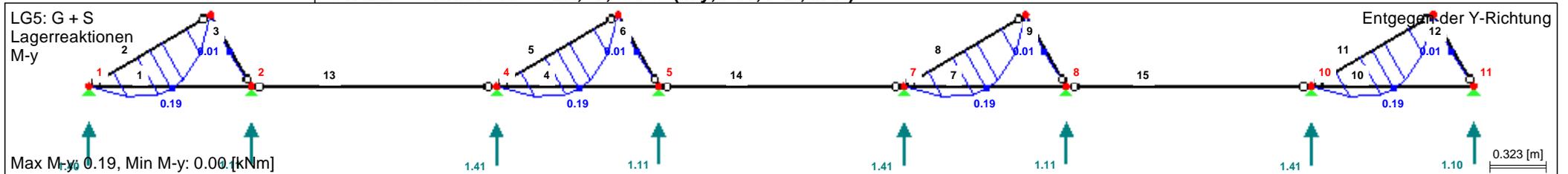
■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S (N, P-X', P-Z', M-Y')



■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S (V-z, P-X', P-Z', M-Y')



■ STÄBE - SCHNITTGRÖSSEN, -Y, G + S (M-y, P-X', P-Z', M-Y')



ANHANG E

KAPPA
FA1
Biegeknicknachweis

■ **BASISANGABEN**

Zu bemessende Stäbe:	3										
Zu bemessende Stabsätze:	Alle										
Zu bemessende Lastfallgruppen:	<table border="0"> <tr><td>LG1</td><td>G + S + W.li</td></tr> <tr><td>LG2</td><td>G + S + W.re</td></tr> <tr><td>LG3</td><td>G + W.li</td></tr> <tr><td>LG4</td><td>G + W.re</td></tr> <tr><td>LG5</td><td>G + S</td></tr> </table>	LG1	G + S + W.li	LG2	G + S + W.re	LG3	G + W.li	LG4	G + W.re	LG5	G + S
LG1	G + S + W.li										
LG2	G + S + W.re										
LG3	G + W.li										
LG4	G + W.re										
LG5	G + S										

■ **DETAILS**

Bemessungsmethode nach DIN 18800:	Nachweismethode 1 nach EI. (321)
Nachweisverfahren:	Elastisch-Plastisch nach DIN 18800
Überprüfung von grenz (c/t)	<input checked="" type="checkbox"/>

■ **MATERIALIEN**

Material Nr.	Material-Bezeichnung	E-Modul E [N/mm ²]	Schubmodul G [N/mm ²]	Querdehnzahl Mue [-]	Streckgrenze f-yk [N/mm ²]	Max. Bauteildicke t [mm]
1	Aluminium EN AW-60	70000.000	27000.000	0.300	88.000	0.000

■ **QUERSCHNITTE**

Querschn Nr	Material Nr.	Querschnitts-bezeichnung	Anmerkung
2	1	DUENQ POS 02	101: Querschnitt des Typs 'Allgemein' -> Interaktionsloser Nachweis

■ **KAPPA-DATEN - STÄBE**

Stab Nr.	Bezeichnung	Parameter
3	Querschnitt	2 - DUENQ POS 02
	Druckstab	<input checked="" type="checkbox"/>
	Knicken um Achse y	<input checked="" type="checkbox"/>
	Knicklängenbeiwert	1.000
	Knicklänge	0.467 m
	Knicklast	28.82 kN
	Schlankheit	0.889
	Knickspannungslinie	c
	Imperfektionsfaktor	0.490
	Abminderungsfaktor	0.607
	Knicken um Achse z	<input type="checkbox"/>

■ **NACHWEISE STABWEISE**

Stab Nr.	Stelle x [mm]	Lastfall	Nachweiskriterium	Kommentar zur Nachweisart
3	233.437	LG2	0.480	2) Nachweis nach Gl. (3) und Gl. (24) erbracht
Querschnittswerte DUENQ POS 02				
A	2.59 cm ²	I _y	0.91 cm ⁴	
A _y	1.30 cm ²	KSL _y	c	
Schnittgrößen				
N _d	-0.91 kN	M _{y,d,Anf}	0.00 kNm	X _{My,d,max} 0.233 m
V _{z,d}	0.00 kN	M _{y,d,End}	0.00 kNm	M _{y,d,min} 0.00 kNm
M _{y,d}	0.04 kNm	M _{y,d,max}	0.04 kNm	X _{My,d,min} 0.467 m
Plastische Grenzschnittgrößen				
N _{pl,k}	22.77 kN	V _{pl,z,k}	1.91 kN	M _{pl,y,k} 0.10 kNm
N _{pl,d}	22.77 kN	V _{pl,z,d}	1.91 kN	M _{pl,y,d} 0.10 kNm
Δ _N	0.040 < 0.10	ΔV _z	0.000 < 0.25	Δ _{My} 0.462 > 0.10
Abminderungsfaktor Kappa				
s _{K,y}	0.467 m	λ _{K,y quer}	0.889	α _y 0.490
N _{Ki,y,k}	28.82 kN	KSL _y	c	κ _y 0.607
Beiwert Beta-m,y				
u	<input checked="" type="checkbox"/>	N konstant	<input type="checkbox"/>	β _{m,y} 1.000
Nachweis				
D _{N,y}	0.066 < 0.1	Δ _n	0.018 ≤ 0.1	
D _{M,y}	0.462	D _{NM}	0.480 < 1.0	
Überprüfung von grenz (c/t) - massgebend Feld Nr. 1				
Typ	Beidseitig	t	2.0 mm	grenz 61.103
b	73.6 mm	α	1.000	vorh 36.795 < 61.103

KAPPA
FA1
Biegeknicknachweis

■ **BASISANGABEN**

Zu bemessende Stäbe:	3,6,9,12-15										
Zu bemessende Stabsätze:	Alle										
Zu bemessende Lastfallgruppen:	<table border="0"> <tr> <td>LG1</td> <td>G + S + W.li</td> </tr> <tr> <td>LG2</td> <td>G + S + W.re</td> </tr> <tr> <td>LG3</td> <td>G + W.li</td> </tr> <tr> <td>LG4</td> <td>G + W.re</td> </tr> <tr> <td>LG5</td> <td>G + S</td> </tr> </table>	LG1	G + S + W.li	LG2	G + S + W.re	LG3	G + W.li	LG4	G + W.re	LG5	G + S
LG1	G + S + W.li										
LG2	G + S + W.re										
LG3	G + W.li										
LG4	G + W.re										
LG5	G + S										

■ **DETAILS**

Bemessungsmethode nach DIN 18800:	Nachweismethode 1 nach El. (321)
Nachweisverfahren:	Elastisch-Plastisch nach DIN 18800
Überprüfung von grenz (c/t)	<input checked="" type="checkbox"/>

■ **MATERIALIEN**

Material Nr.	Material-Bezeichnung	E-Modul E [N/mm ²]	Schubmodul G [N/mm ²]	Querdehnzahl Mue [-]	Streckgrenze f-yk [N/mm ²]	Max. Bauteildicke t [mm]
1	Aluminium EN AW-60	70000.000	27000.000	0.300	88.000	0.000

■ **QUERSCHNITTE**

Querschn Nr	Material Nr.	Querschnitts-bezeichnung	Anmerkung
1	1	DUENQ POS 02	101: Querschnitt des Typs 'Allgemein' -> Interaktionsloser Nachweis

■ **KAPPA-DATEN - STÄBE**

Stab Nr.	Bezeichnung	Parameter
3	Querschnitt	1 - DUENQ POS 02
	Druckstab	<input checked="" type="checkbox"/>
	Knicken um Achse y	<input checked="" type="checkbox"/>
	Knicklängenbeiwert	1.000
	Knicklänge	0.467 m
	Knicklast	28.82 kN
	Schlankheit	0.889
	Knickspannungslinie	c
	Imperfektionsfaktor	0.490
	Abminderungsfaktor	0.607
Knicken um Achse z	<input type="checkbox"/>	
6	Querschnitt	1 - DUENQ POS 02
	Druckstab	<input checked="" type="checkbox"/>
	Knicken um Achse y	<input checked="" type="checkbox"/>
	Knicklängenbeiwert	1.000
	Knicklänge	0.467 m
	Knicklast	28.82 kN
	Schlankheit	0.889
	Knickspannungslinie	c
	Imperfektionsfaktor	0.490
	Abminderungsfaktor	0.607
Knicken um Achse z	<input type="checkbox"/>	
9	Querschnitt	1 - DUENQ POS 02
	Druckstab	<input checked="" type="checkbox"/>
	Knicken um Achse y	<input checked="" type="checkbox"/>
	Knicklängenbeiwert	1.000
	Knicklänge	0.467 m
	Knicklast	28.82 kN
	Schlankheit	0.889
	Knickspannungslinie	c
	Imperfektionsfaktor	0.490
	Abminderungsfaktor	0.607
Knicken um Achse z	<input type="checkbox"/>	
12	Querschnitt	1 - DUENQ POS 02
	Druckstab	<input checked="" type="checkbox"/>
	Knicken um Achse y	<input checked="" type="checkbox"/>
	Knicklängenbeiwert	1.000
	Knicklänge	0.467 m
	Knicklast	28.82 kN
	Schlankheit	0.889
	Knickspannungslinie	c
	Imperfektionsfaktor	0.490
	Abminderungsfaktor	0.607
Knicken um Achse z	<input type="checkbox"/>	
13	Querschnitt	1 - DUENQ POS 02
	Druckstab	<input checked="" type="checkbox"/>
	Knicken um Achse y	<input checked="" type="checkbox"/>
	Knicklängenbeiwert	1.000
	Knicklänge	1.410 m

■ **KAPPA-DATEN - STÄBE**

Stab Nr.	Bezeichnung	Parameter
13	Knicklast	3.16 kN
	Schlankheit	2.684
	Knickspannungslinie	c
	Imperfektionsfaktor	0.490
	Abminderungsfaktor	0.117
	Knicken um Achse z	<input type="checkbox"/>
14	Querschnitt	1 - DUENQ POS 02
	Druckstab	<input checked="" type="checkbox"/>
	Knicken um Achse y	<input checked="" type="checkbox"/>
	Knicklängenbeiwert	1.000
	Knicklänge	1.410 m
	Knicklast	3.16 kN
	Schlankheit	2.684
	Knickspannungslinie	c
	Imperfektionsfaktor	0.490
	Abminderungsfaktor	0.117
	Knicken um Achse z	<input type="checkbox"/>
15	Querschnitt	1 - DUENQ POS 02
	Druckstab	<input checked="" type="checkbox"/>
	Knicken um Achse y	<input checked="" type="checkbox"/>
	Knicklängenbeiwert	1.000
	Knicklänge	1.410 m
	Knicklast	3.16 kN
	Schlankheit	2.684
	Knickspannungslinie	c
	Imperfektionsfaktor	0.490
	Abminderungsfaktor	0.117
	Knicken um Achse z	<input type="checkbox"/>

■ **NACHWEISE QUERSCHNITTWEISE**

Stab Nr.	Stelle x [mm]	Lastfall	Nachweiskriterium	Kommentar zur Nachweisart		
Querschnitt 1 - DUENQ POS 02						
13	0.000	LG4	0.970	2) Nachweis nach Gl. (3) und Gl. (24) erbracht		
Querschnittswerte DUENQ POS 02						
A	2.59	cm ²	I _y	0.91	cm ⁴	
A _y	1.30	cm ²	KSL _y	c		
Schnittgrößen						
N _d	-2.52	kN	M _{y,d,Anf}	0.00	kNm	X _{My,d,min} 0.705 m
V _{z,d}	0.00	kN	M _{y,d,End}	0.00	kNm	
M _{y,d}	0.00	kNm	M _{y,d,min}	0.00	kNm	
Plastische Grenzschnittgrößen						
N _{pl,k}	22.77	kN	V _{pl,z,k}	1.91	kN	M _{pl,y,k} 0.10 kNm
N _{pl,d}	22.77	kN	V _{pl,z,d}	1.91	kN	M _{pl,y,d} 0.10 kNm
Δ _N	0.111	> 0.10	Δ _{Vz}	0.002	< 0.25	Δ _{My} 0.000 < 0.10
Abminderungsfaktor Kappa						
S _{K,y}	1.410	m	λ _{K,y quer}	2.684		α _y 0.490
N _{Ki,y,k}	3.16	kN	KSL _y	c		κ _y 0.117
Beiwert Beta-m,y						
Q-Last z	<input checked="" type="checkbox"/>		u	<input type="checkbox"/>		β _{m,y} 1.000
Nachweis						
D _{N,y}	0.950	> 0.1	Δ _n	0.005	≤ 0.1	
D _{M,y}	0.016		D _{NM}	0.970	< 1.0	
Überprüfung von grenz (c/t) - massgebend Feld Nr. 3						
Typ	Einseitig		t	3.0	mm	grenz 21.719
b	17.8	mm	α	0.836		vorh 5.933 < 21.719

■ **NACHWEISE STABWEISE**

Stab Nr.	Stelle x [mm]	Lastfall	Nachweiskriterium	Kommentar zur Nachweisart		
3	233.437	LG2	0.334	2) Nachweis nach Gl. (3) und Gl. (24) erbracht		
Querschnittswerte DUENQ POS 02						
A	2.59	cm ²	I _y	0.91	cm ⁴	
A _y	1.30	cm ²	KSL _y	c		
Schnittgrößen						
N _d	-0.91	kN	M _{y,d,Anf}	0.00	kNm	X _{My,d,max} 0.233 m
V _{z,d}	0.00	kN	M _{y,d,End}	0.00	kNm	M _{y,d,min} 0.00 kNm
M _{y,d}	0.03	kNm	M _{y,d,max}	0.03	kNm	X _{My,d,min} 0.467 m
Plastische Grenzschnittgrößen						
N _{pl,k}	22.77	kN	V _{pl,z,k}	1.91	kN	M _{pl,y,k} 0.10 kNm
N _{pl,d}	22.77	kN	V _{pl,z,d}	1.91	kN	M _{pl,y,d} 0.10 kNm
Δ _N	0.040	< 0.10	Δ _{Vz}	0.000	< 0.25	Δ _{My} 0.316 > 0.10
Abminderungsfaktor Kappa						
S _{K,y}	0.467	m	λ _{K,y quer}	0.889		α _y 0.490
N _{Ki,y,k}	28.82	kN	KSL _y	c		κ _y 0.607
Beiwert Beta-m,y						
u	<input checked="" type="checkbox"/>		N konstant	<input type="checkbox"/>		β _{m,y} 1.000
Nachweis						
D _{N,y}	0.066	< 0.1	Δ _n	0.018	≤ 0.1	
D _{M,y}	0.316		D _{NM}	0.334	< 1.0	
Überprüfung von grenz (c/t) - massgebend Feld Nr. 1						
Typ	Beidseitig		t	2.0	mm	grenz 61.103
b	73.6	mm	α	1.000		vorh 36.795 < 61.103

■ **NACHWEISE STABWEISE**

Stab Nr.	Stelle x [mm]	Lastfall	Nachweiskriterium	Kommentar zur Nachweisart		
6	233.437	LG2	0.335	2) Nachweis nach Gl. (3) und Gl. (24) erbracht		
Querschnittswerte DUENQ POS 02						
A	2.59	cm ²	I _y	0.91	cm ⁴	
A _y	1.30	cm ²	KSL _y	c		
Schnittgrößen						
N _d	-0.98	kN	M _{y,d,Anf}	0.00	kNm	X _{My,d,max} 0.233 m
V _{z,d}	0.00	kN	M _{y,d,End}	0.00	kNm	
M _{y,d}	0.03	kNm	M _{y,d,max}	0.03	kNm	
Plastische Grenzschnittgrößen						
N _{pl,k}	22.77	kN	V _{pl,z,k}	1.91	kN	M _{pl,y,k} 0.10 kNm
N _{pl,d}	22.77	kN	V _{pl,z,d}	1.91	kN	M _{pl,y,d} 0.10 kNm
Δ _N	0.043	< 0.10	ΔV _z	0.000	< 0.25	ΔM _y 0.316 > 0.10
Abminderungsfaktor Kappa						
S _{K,y}	0.467	m	λ _{K,y quer}	0.889		α _y 0.490
N _{Ki,y,k}	28.82	kN	KSL _y	c		κ _y 0.607
Beiwert Beta-m,y						
u	<input checked="" type="checkbox"/>		N konstant	<input type="checkbox"/>		β _{m,y} 1.000
Nachweis						
D _{N,y}	0.071	< 0.1	Δ _n	0.019	≤ 0.1	
D _{M,y}	0.316		D _{NM}	0.335	< 1.0	
Überprüfung von grenz (c/t) - massgebend Feld Nr. 1						
Typ	Beidseitig		t	2.0	mm	grenz 61.103
b	73.6	mm	α	1.000		vorh 36.795 < 61.103
9	233.437	LG2	0.335	2) Nachweis nach Gl. (3) und Gl. (24) erbracht		
Querschnittswerte DUENQ POS 02						
A	2.59	cm ²	I _y	0.91	cm ⁴	
A _y	1.30	cm ²	KSL _y	c		
Schnittgrößen						
N _d	-0.98	kN	M _{y,d,Anf}	0.00	kNm	X _{My,d,max} 0.233 m
V _{z,d}	0.00	kN	M _{y,d,End}	0.00	kNm	M _{y,d,min} 0.00 kNm
M _{y,d}	0.03	kNm	M _{y,d,max}	0.03	kNm	X _{My,d,min} 0.467 m
Plastische Grenzschnittgrößen						
N _{pl,k}	22.77	kN	V _{pl,z,k}	1.91	kN	M _{pl,y,k} 0.10 kNm
N _{pl,d}	22.77	kN	V _{pl,z,d}	1.91	kN	M _{pl,y,d} 0.10 kNm
Δ _N	0.043	< 0.10	ΔV _z	0.000	< 0.25	ΔM _y 0.316 > 0.10
Abminderungsfaktor Kappa						
S _{K,y}	0.467	m	λ _{K,y quer}	0.889		α _y 0.490
N _{Ki,y,k}	28.82	kN	KSL _y	c		κ _y 0.607
Beiwert Beta-m,y						
u	<input checked="" type="checkbox"/>		N konstant	<input type="checkbox"/>		β _{m,y} 1.000
Nachweis						
D _{N,y}	0.071	< 0.1	Δ _n	0.019	≤ 0.1	
D _{M,y}	0.316		D _{NM}	0.335	< 1.0	
Überprüfung von grenz (c/t) - massgebend Feld Nr. 1						
Typ	Beidseitig		t	2.0	mm	grenz 61.103
b	73.6	mm	α	1.000		vorh 36.795 < 61.103
12	233.437	LG2	0.480	2) Nachweis nach Gl. (3) und Gl. (24) erbracht		
Querschnittswerte DUENQ POS 02						
A	2.59	cm ²	I _y	0.91	cm ⁴	
A _y	1.30	cm ²	KSL _y	c		
Schnittgrößen						
N _d	-0.91	kN	M _{y,d,Anf}	0.00	kNm	X _{My,d,max} 0.233 m
V _{z,d}	0.00	kN	M _{y,d,End}	0.00	kNm	
M _{y,d}	0.04	kNm	M _{y,d,max}	0.04	kNm	
Plastische Grenzschnittgrößen						
N _{pl,k}	22.77	kN	V _{pl,z,k}	1.91	kN	M _{pl,y,k} 0.10 kNm
N _{pl,d}	22.77	kN	V _{pl,z,d}	1.91	kN	M _{pl,y,d} 0.10 kNm
Δ _N	0.040	< 0.10	ΔV _z	0.000	< 0.25	ΔM _y 0.462 > 0.10
Abminderungsfaktor Kappa						
S _{K,y}	0.467	m	λ _{K,y quer}	0.889		α _y 0.490
N _{Ki,y,k}	28.82	kN	KSL _y	c		κ _y 0.607
Beiwert Beta-m,y						
u	<input checked="" type="checkbox"/>		N konstant	<input type="checkbox"/>		β _{m,y} 1.000
Nachweis						
D _{N,y}	0.066	< 0.1	Δ _n	0.018	≤ 0.1	
D _{M,y}	0.462		D _{NM}	0.480	< 1.0	
Überprüfung von grenz (c/t) - massgebend Feld Nr. 1						
Typ	Beidseitig		t	2.0	mm	grenz 61.103
b	73.6	mm	α	1.000		vorh 36.795 < 61.103
13	0.000	LG4	0.970	2) Nachweis nach Gl. (3) und Gl. (24) erbracht		
Querschnittswerte DUENQ POS 02						
A	2.59	cm ²	I _y	0.91	cm ⁴	
A _y	1.30	cm ²	KSL _y	c		
Schnittgrößen						
N _d	-2.52	kN	M _{y,d,Anf}	0.00	kNm	X _{My,d,min} 0.705 m
V _{z,d}	0.00	kN	M _{y,d,End}	0.00	kNm	
M _{y,d}	0.00	kNm	M _{y,d,min}	0.00	kNm	
Plastische Grenzschnittgrößen						
N _{pl,k}	22.77	kN	V _{pl,z,k}	1.91	kN	M _{pl,y,k} 0.10 kNm
N _{pl,d}	22.77	kN	V _{pl,z,d}	1.91	kN	M _{pl,y,d} 0.10 kNm
Δ _N	0.111	> 0.10	ΔV _z	0.002	< 0.25	ΔM _y 0.000 < 0.10
Abminderungsfaktor Kappa						
S _{K,y}	1.410	m	λ _{K,y quer}	2.684		α _y 0.490
N _{Ki,y,k}	3.16	kN	KSL _y	c		κ _y 0.117
Beiwert Beta-m,y						
Q-Last z	<input checked="" type="checkbox"/>		u	<input type="checkbox"/>		β _{m,y} 1.000
Nachweis						
D _{N,y}	0.950	> 0.1	Δ _n	0.005	≤ 0.1	
D _{M,y}	0.016		D _{NM}	0.970	< 1.0	
Überprüfung von grenz (c/t) - massgebend Feld Nr. 3						
Typ	Einseitig		t	3.0	mm	grenz 21.719

■ **NACHWEISE STABWEISE**

Stab Nr.	Stelle x [mm]	Lastfall	Nachweis-kriterium	Kommentar zur Nachweisart		
	b	17.8 mm	α	0.836	vorh	5.933 < 21.719
14	0.000	LG4	0.728	2) Nachweis nach Gl. (3) und Gl. (24) erbracht		
Querschnittswerte DUENQ POS 02						
A	2.59 cm ²		I_y	0.91 cm ⁴		
A _y	1.30 cm ²		KSL_y	c		
Schnittgrößen						
N _d	-1.83 kN		$M_{y,d,Anf}$	0.00 kNm	$x_{My,d,min}$	0.705 m
V _{z,d}	0.00 kN		$M_{y,d,End}$	0.00 kNm		
M _{y,d}	0.00 kNm		$M_{y,d,min}$	0.00 kNm		
Plastische Grenzschnittgrößen						
N _{pl,k}	22.77 kN		$V_{pl,z,k}$	1.91 kN	$M_{pl,y,k}$	0.10 kNm
N _{pl,d}	22.77 kN		$V_{pl,z,d}$	1.91 kN	$M_{pl,y,d}$	0.10 kNm
Δ_N	0.080 < 0.10		Δ_{Vz}	0.002 < 0.25	Δ_{My}	0.000 < 0.10
Abminderungsfaktor Kappa						
S _{K,y}	1.410 m		$\lambda_{K,y,quer}$	2.684	α_y	0.490
N _{Ki,y,k}	3.16 kN		KSL_y	c	κ_y	0.117
Beiwert Beta-m,y						
Q-Last z	<input checked="" type="checkbox"/>		u	<input type="checkbox"/>	$\beta_{m,y}$	1.000
Nachweis						
D _{N,y}	0.691 > 0.1		Δ_n	0.021 ≤ 0.1		
D _{M,y}	0.016		D _{NM}	0.728 < 1.0		
Überprüfung von grenz (c/t) - massgebend Feld Nr. 3						
Typ	Einseitig		t	3.0 mm	grenz	21.719
b	17.8 mm		α	0.836	vorh	5.933 < 21.719
15	0.000	LG4	0.472	2) Nachweis nach Gl. (3) und Gl. (24) erbracht		
Querschnittswerte DUENQ POS 02						
A	2.59 cm ²		I_y	0.91 cm ⁴		
A _y	1.30 cm ²		KSL_y	c		
Schnittgrößen						
N _d	-1.15 kN		$M_{y,d,Anf}$	0.00 kNm	$x_{My,d,min}$	0.705 m
V _{z,d}	0.00 kN		$M_{y,d,End}$	0.00 kNm		
M _{y,d}	0.00 kNm		$M_{y,d,min}$	0.00 kNm		
Plastische Grenzschnittgrößen						
N _{pl,k}	22.77 kN		$V_{pl,z,k}$	1.91 kN	$M_{pl,y,k}$	0.10 kNm
N _{pl,d}	22.77 kN		$V_{pl,z,d}$	1.91 kN	$M_{pl,y,d}$	0.10 kNm
Δ_N	0.050 < 0.10		Δ_{Vz}	0.002 < 0.25	Δ_{My}	0.000 < 0.10
Abminderungsfaktor Kappa						
S _{K,y}	1.410 m		$\lambda_{K,y,quer}$	2.684	α_y	0.490
N _{Ki,y,k}	3.16 kN		KSL_y	c	κ_y	0.117
Beiwert Beta-m,y						
Q-Last z	<input checked="" type="checkbox"/>		u	<input type="checkbox"/>	$\beta_{m,y}$	1.000
Nachweis						
D _{N,y}	0.432 > 0.1		Δ_n	0.024 ≤ 0.1		
D _{M,y}	0.016		D _{NM}	0.472 < 1.0		
Überprüfung von grenz (c/t) - massgebend Feld Nr. 3						
Typ	Einseitig		t	3.0 mm	grenz	21.719
b	17.8 mm		α	0.836	vorh	5.933 < 21.719

ANHANG F

Abschlussbericht TAG3-JGr-1007-E03

Mechanische Lastprüfung

für:

SiG Solar GmbH
Am Bollmann 14
28816 Stuhr

bearbeitet von:

Dipl.-Ing. (FH) Jakob Grimm
Juli 2010

Adresse:

Fraunhofer Institut
für Solare Energiesysteme ISE
Abteilung Thermische Anlagen und Gebäudetechnik
Heidenhofstraße 2
79110 Freiburg

Inhalt

1	Leistungsbeschreibung	3
2	Skizzierung des Prüfverfahrens	4
2.1	Moduldaten	4
2.2	Modulmontage	4
3	Ergebnis	6

Dieser Bericht umfasst 7 Seiten. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse darf nicht unvollständig oder in sinnentstellendem Zusammenhang erfolgen. Die Weitergabe an Dritte bedarf der vorherigen Zustimmung der SiG Solar GmbH.

Freiburg, 22 Juli 2010

Dipl.-Ing. (FH) Jakob Grimm
Prüfingenieur

Dipl.-Phys. Dipl.-Ing. (Arch.) Claudio Ferrara
Leiter Test Lab PV Modules (TLPV)

1 Leistungsbeschreibung

An einem monokristallinen Photovoltaikmodul wird die mechanische Lastprüfung gemäß IEC 61215 10.16 durchgeführt. Vor und nach der Prüfung wird eine Elektrolumineszenzaufnahme des Moduls gemacht. Das Modul wird für die Prüfung gemäß einer Montageanleitung der SiG-Solar GmbH befestigt.

Die mechanische Lastprüfung simuliert in der Praxis auftretende, statische Belastungen des Moduls durch Wind, Schnee oder Eis. Hierzu werden die Vorder- und Rückseite des Moduls abwechselnd für jeweils eine Stunde mit 2400 Pa belastet. Dieser Vorgang wird dreimal wiederholt, sodass sich eine Gesamtprüfzeit von sechs Stunden ergibt. Soll nachgewiesen werden, ob das Modul auch erhöhten Schnee- und Eisbelastungen standhält, wird die Vorderseite im letzten Zyklus mit 5400 Pa belastet.

Während der Prüfung wird an das Modul eine Spannung angelegt, sodass an dem Widerstand der inneren Schaltung ein messbarer Strom abfällt. Während der Prüfung darf es nicht zu einem Abbruch des Stromflusses kommen.

Bild 1:

Teststand für die mechanische Lastprüfung



Probeneingang: 25.01.2010

Datum der Prüfung: 01.07.2010

2 Skizzierung des Prüfverfahrens

2.1 Moduldaten

Bei dem geprüften Modul handelt es sich um ein monokristallines PV-Modul des Herstellers *Ningbo Solar Electric Power Co., Ltd.* mit der Typenbezeichnung *SunEarth® TDB 125*125-72-P*. Tabelle 1 zeigt die elektrischen Daten laut Herstellerangaben. Dem Modul wurde die interne Auftragsnummer IEC-10511-M7 zugeteilt. Es trägt die Seriennummer P0969118971.

Tabelle1:

Elektrische Daten
SunEarth® TDB
*125*125-72-P*
(Herstellerangaben)

P_{mpp}	180 W
U_{mpp}	36,2 V
I_{mpp}	4,98 A
U_{oc}	44,6 V
I_{sc}	5,28 A

2.2 Modulmontage

Die Modulmontage erfolgte gemäß den Angaben von SiG-Solar. Es wurde eine Montagesituation simuliert, bei der das Modul auf vier Punkten mit einer Fläche von jeweils $20 \times 50 \text{ mm}^2$ aufliegt (siehe Bild 2) und mit Modulklemmen befestigt wird. Verwendet wurden ebenfalls 50 mm breite Aluminiumprofile, welche an den Ecken der kurzen Modulseiten 20 mm weit unter das Modul geschoben wurden (siehe Bild 3).

Bild 2

Montagesituationen bei der mechanischen Lastprüfung (Skizze)

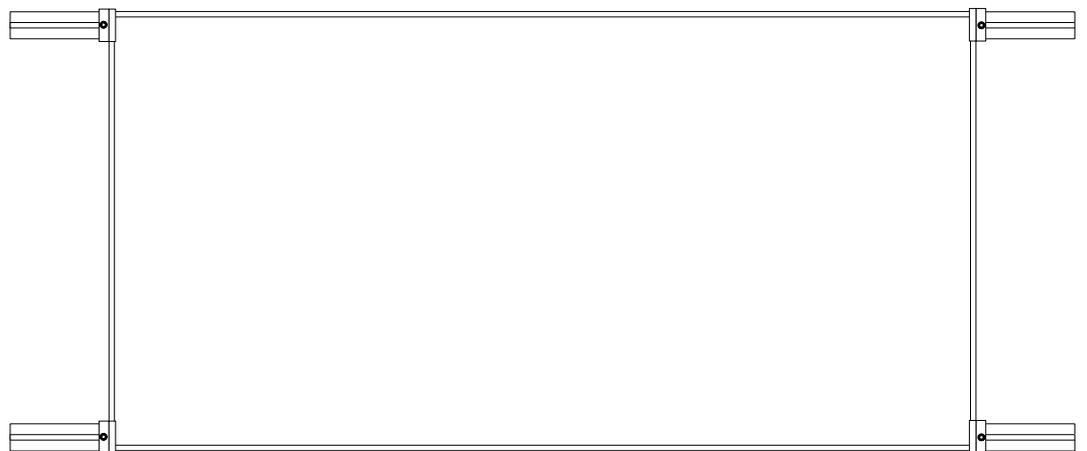
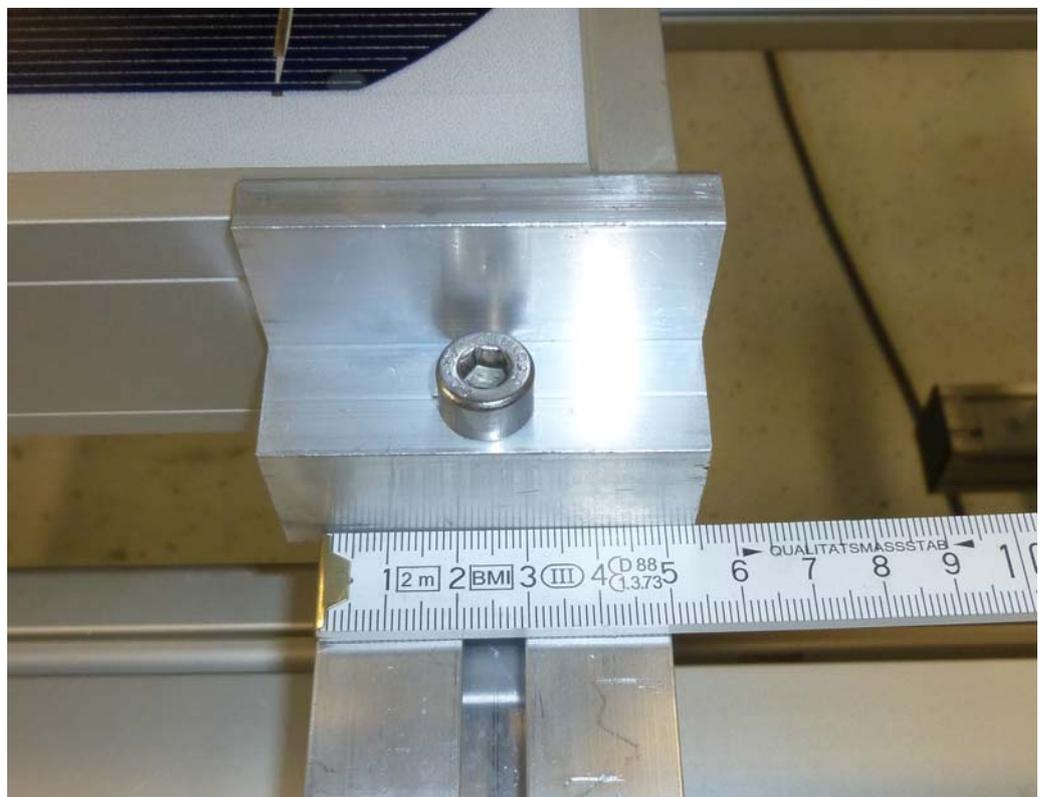
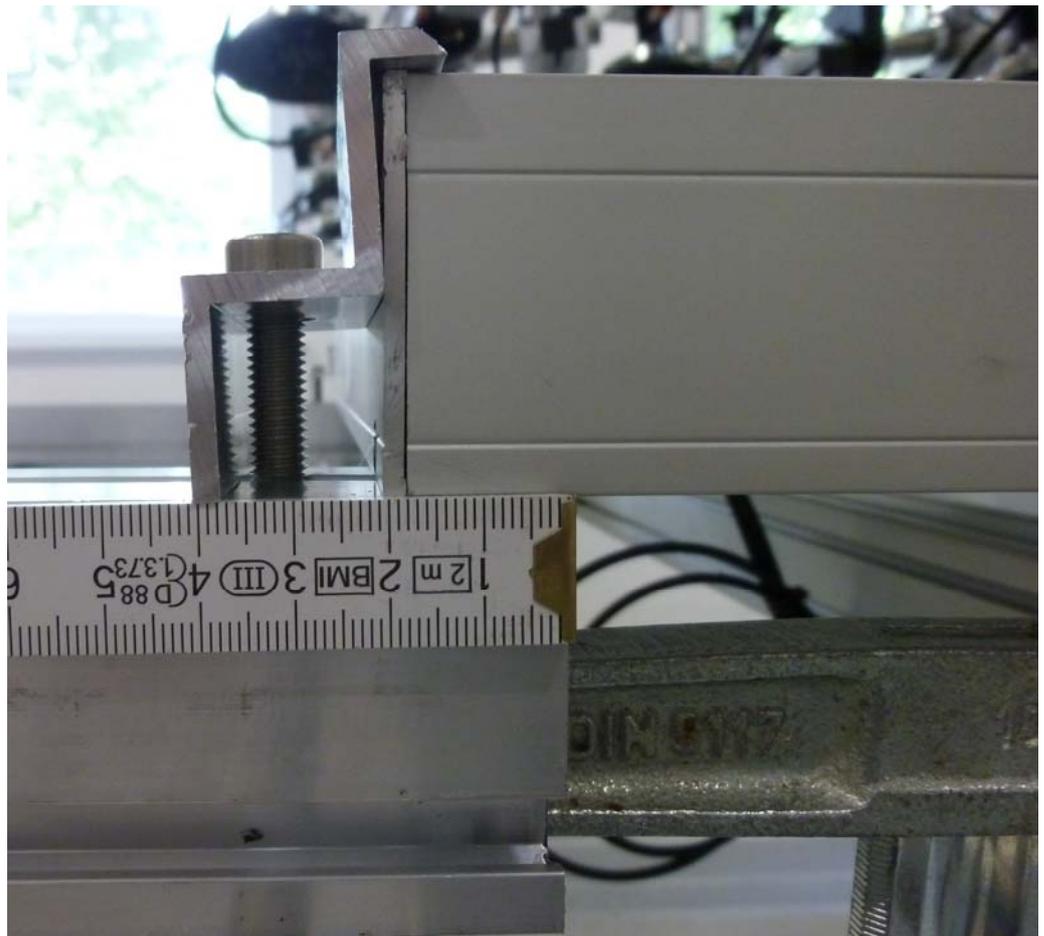


Bild 3:

Montagesituation bei
der mechanischen
Lastprüfung

Modul:
IEC-10511-M7
P0969118971



3 Ergebnis

Das Modul hat die Prüfung unbeschadet überstanden. In Bild 4 ist der zeitlichen Verlauf der Belastung und die daraus resultierende Auslenkung des Moduls dargestellt. Man erkennt, dass sich das Modul bei normaler Belastung (2400 Pa bzw. -2400 Pa) etwa 20 mm und bei erhöhter Belastung (5400 Pa) etwa 45 mm durchbiegt.

Bild 5 zeigt, dass es während der Prüfung nicht zu einer Unterbrechung des Stromflusses durch die innere Schaltung des Moduls kam, was eine zentrale Anforderung für das Bestehen dieser Prüfung ist.

Bild 4:

Zeitlicher Verlauf der Belastung und der resultierende Auslenkung

Modul:
IEC-10511-M7
P0969118971

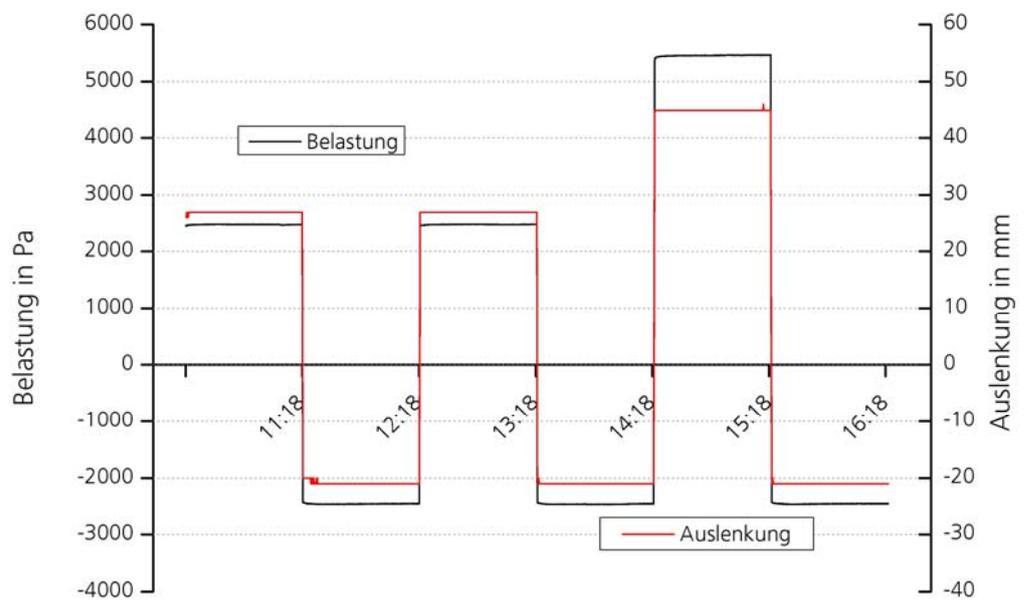
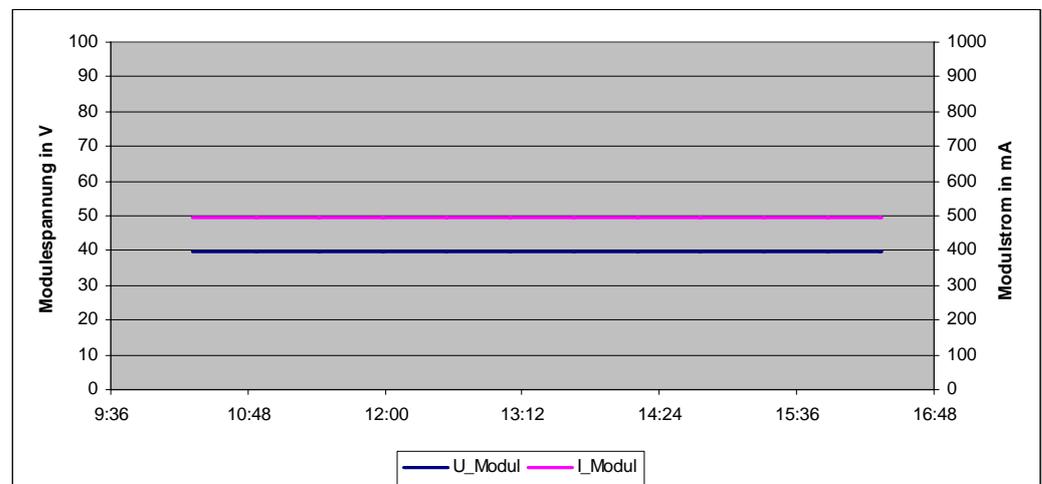


Bild 5:

Modulstrom und Modulspannung während der Prüfung

Modul:
IEC-10511-M7
P0969118971



Auf den Elektrolumineszenzaufnahmen (Bild 6) sind Microcracks in mehreren Zellen zu sehen, was nach einer Prüfung mit erhöhter Belastung jedoch nicht unüblich ist.

Bild 6:

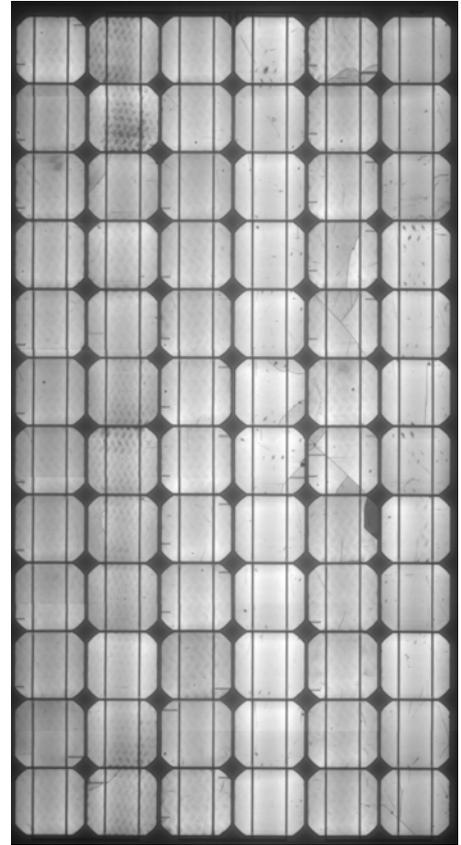
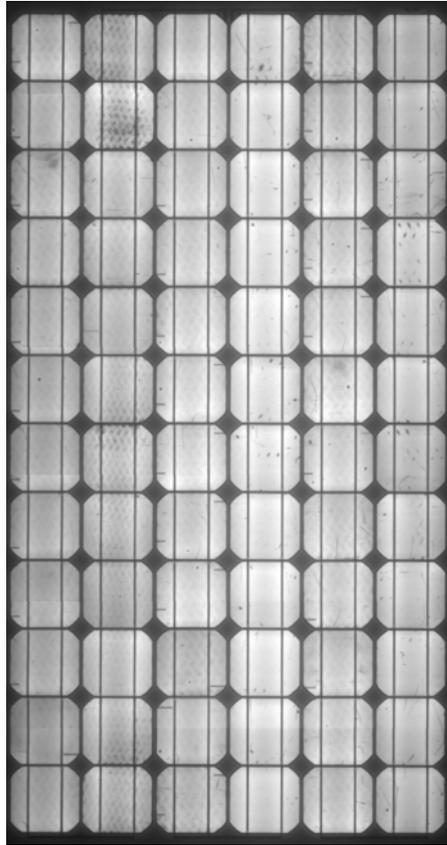
Elektrolumineszenzaufnahme

Messstrom: 5,20 A
Belichtungszeit: 1ms

Modul:
IEC-10511-M7
P0969118971

Links:
Vor der Prüfung

Rechts:
Nach der Prüfung



VI Literaturverzeichnis

- [1] **Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2009** [Bericht] / Verf. BMU - Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit. - [s.l.] : BMU, März 2010.
- [2] **Global market outlook for photovoltaics until 2014** [Bericht] / Verf. EPIA - European Photovoltaic Industry Association. - [s.l.] : EPIA, Mai 2010.
- [3] **www.pvXchange.com** [Online] / Verf. pvXchange. - pvXchange GmbH, 2004. - Aug. 2010. - www.pvxchange.com/de/index.php/preisindex_3.html.
- [4] **Fachregel für Abdichtungen - Flachdachrichtlinie** - [Richtlinie] / Verf. ZVDH Zentralverband des deutschen Dachdeckerhandwerks. - [s.l.] : Rudolf Müller, Okt. 2008.
- [5] **Dächer mit Dachabdichtungen: Grundlagen systematisch dargestellt** [Buch] / Verf. Schubert Reinhard. - Bochum : Kleffmann, 1990. - ISBN: 3-87414-089-X.
- [6] **Grundregeln für Dachdeckungen, Abdichtungen und Außenwandbekleidungen** [Buch] / Verf. ZVDH Zentralverband des Deutschen Dachdeckerverbandes. - [s.l.] : Rudolf Müller, Sep. 1997.
- [7] **Leitfaden Photovoltaische Anlagen** [Buch] / Verf. DGS / Hrsg. Deutsche-Gesellschaft-für-Sonnenenergie. - Berlin : [s.n.], 2008. - ISBN: 978-3-00-023734-8.
- [8] **Tragkonstruktionen für Solaranlagen** [Buch] / Verf. Erfurth Reinhard, Göring Jens und Delzer Thomas / Hrsg. Solarpraxis Supernova AG Berlin. - Chemnitz : ERFURT + PARTNER Beratende Ingenieure GmbH, Steinbeis-Transferzentrum Energie und Umwelttechnik Chemnitz, 2001. - ISBN: 3-934595-11-1.
- [9] **Photovoltaik: Technik, Gestaltung, Konstruktion** [Buch] / Verf. Weller Bernhard, Hemmerle Claudia und u.a. / Hrsg. DETAIL_Praxis. - Regensburg : Aumüller Druck, 2009. - ISBN:978-3-920034-25-6.
- [10] **Musterbauordnung** [Gesetz] / Verf. MBO. - [s.l.] : Bauministeriumkonferenz, Feb. 2002.
- [11] **Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland** [Gesetz] / Verf. GG. - [s.l.] : Bundesministerium der Justiz, Mai 1949.
- [12] **Bürgerliches Gesetzbuch** [Gesetz] / Verf. BGB. - [s.l.] : Bundesministeriums der Justiz, Sep.2009.

- [13] **Strafgesetzbuch: § 319 Bauegefährdung (2), (3), (4)** [Gesetz] / Verf. StGB. - [s.l.] : Bundesministeriums der Justiz, Okt. 2009.
- [14] **Dem Wind ein Schnippchen schlagen** [Artikel] / Verf. Riedel Anja // photovoltaik. - 2010. - April.
- [15] **Große Haie, kleine Fische** [Artikel] / Verf. Siemer Jochen // PHOTON Profi. - 2010. - Jan..
- [16] **Genehmigung von Photovoltaikanlagen - Ein Leitfaden zum Baurecht** [Bericht] / Verf. Prof. Gerd Becker, Walter Weber. - München : Solarenergieförderverein Bayern e.V., März 04.
- [17] **Anwendungstechnologie Aluminium** [Buch] / Verf. Ostermann Friedrich. - Berlin-Heidelberg : Springer, 2007. - ISBN 978-3-540-71196-4.
- [18] **Methoden der Produktentwicklung** [Buch] / Verf. Engel Werner. - München : Oldenburg Industrieverlag, 2006.
- [19] **Bis heute kein Rechenverfahren** [Artikel] / Verf. Riedel Anja // Photovoltaik. - [s.l.] : Photovoltaik, 2009. - 08/2009.
- [20] **Solarmodule 2010 - Marktübersicht** [Artikel] / Verf. Siemer Jochen // PHOTON. - 2010. - Feb. 2010.
- [21] **Unterschiedliche Hinterlüftung von kristallinen PV-Modulen bei Wannentmontage, z.B auf Flachdächern** [Bericht] / Verf. Dipl.-Ing. (FH) Zentgraf Ebenhard. - Waldaschaff : TEC-Institut für technische Innovationen GmbH & Co. KG, Nov. 2009.
- [22] **Erfahrungsbericht: Flachdach-Gefälle-Pfützenbildung** [Bericht] / Verf. Dipl. Ing. Architekt Drefahl Jens. - [s.l.] : CDI Dachsachverständigte, Jan. 2008.

Normen

- [I] **DIN 1055-3; Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 3: Eigen- und Nutzlasten für Hochbauten** [Norm] / Verf. Deutsches Institut für Normung. - Berlin : Beuth Verlag GmbH, März 2006.
- [II] **DIN 18531-1; Dachabdichtungen - Abdichtungen für nicht genutzte Dächer, Teil 1: Befriffe, Anforderungen, Planungsgrundsätze** [Norm] / Verf. Normung Deutsches Institut für. - Berlin : Beuth, Nov. 2005.
- [III] **DIN 4108-10; Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe – Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe** [Norm] / Verf. Deutsches Institut für Normung. - Berlin : Beuth Verlag, Jun. 2008.
- [IV] **DIN EN 826; Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung** [Norm] / Verf. Deutsches Institut für Normung. - Berlin : Beuth Verlag, Mai 1996.
- [V] **DIN EN 1606; Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung des Langzeit-Kriechverhaltens bei Druckbeanspruchung** [Norm] / Verf. Deutsches Institut für Normung. - Berlin : Beuth, Jun. 2007.
- [VI] **DIN 1055-4; Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten** [Norm] / Verf. Deutsches Institut für Normung. - Berlin : Beuth Verlag GmbH, März 2005.
- [VII] **DIN 1055-5; Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 5: Schnee- und Eislasten** [Norm] / Verf. Deutsches Institut für Normung. - Berlin : Beuth Verlag GmbH, Juli 2005.
- [VIII] **DIN EN 1991-1-4:2005; Allgemeine Einwirkungen, Windlasten** [Norm] / Verf. Normausschuss Bauwesen (NABau). - Berlin : Beuth, Juli 2005.
- [IX] **DIN 1055-100; Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregel** [Norm] / Verf. normung Deutsches Institut für. - Berlin : Beuth Verlag, März 2001.
- [X] **DIN EN 1999-1-1; Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln** [Norm] / Verf. Normung Deutsches Institut für. - Berlin : Beuth Verlag, Mai 2010.
- [XI] **DIN 18800; Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion** [Norm] / Verf. Normung Deutsches Institut für. - Berlin : Beuth Verlag, Nov. 2008.