

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

1

Sicherheitsrelevante Aspekte bei Photovoltaik-Anlagen

Prof. Dr. Heinrich Häberlin
Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Fachbereich Elektro- und Kommunikationstechnik
Photovoltaik-Labor
Tel. 034 426 68 11, Fax 034 426 68 13
CH-3400 Burgdorf / SCHWEIZ
Internet: www.pvtest.ch
e-Mail: heinrich.haeberlin@bfh.ch

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

2

1. Einführung

- AC-Seite (Wechselrichter und Netzanschluss) durch viele Normen erfasst, besondere Aufmerksamkeit durch Installationskontrolle ⇒ dadurch sollte eine genügende Sicherheit gewährleistet sein.
- In diesem Vortrag: Konzentration auf **Sicherheit auf der DC-Seite**, deren Gefahren noch weniger bekannt sind und die auch weniger kontrolliert wird.

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

3

Elektrische Gefahren beim Solargenerator:

- Gleichströme haben grösseres Risiko von Brandauslösung (fehlende Stromnulldurchgänge, Stromquellencharakteristik)
- Überhitzte Kontakte oder Verbindungen in Modulen können zu Schäden an Teilen des Solargenerators, Lichtbogenbildung und im Extremfall zu Bränden führen.
- Durch nahe gelegene Blitzströme können hohe induzierte Spannungen und Ströme entstehen, die Bypassdioden so beschädigen, dass im Extremfall Brandgefahr besteht.
- Schlechte Kontakte im Generatoranschlusskasten können ebenfalls zu Bränden führen.
- Allgemeine Gefährdung der Feuerwehr im Brandfall durch nicht abschaltbare DC-Spannung des Solargenerators

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

4

Weitere Gefahren beim Solargenerator:

- Vom Solargenerator ausgehende Brände können im Extremfall auf Gebäude übergreifen (bei bisher bekannten Bränden (z.B. Bürstadt) zum Glück noch nicht erfolgt).
- Schneedruck kann Solarmodule beschädigen ⇒ Sicherheitsproblem. Aktuelle Norm IEC 61215 berücksichtigt effektiv auftretende Belastung ungenügend!
- Erhöhte Gefahr von Dachlawinen besonders bei gebäudeintegrierten PV-Anlagen ⇒ Gefährdung von Personen und Sachen unterhalb Anlage!

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

5

Bilder von Brandschäden an einigen PV-Anlagen



Brand an PV-Anlage von 2kW mit trafolosem Wechselrichter, der von Modulen fragwürdiger Qualität und unzulässiger Montage ausging. Dank Aufdachmontage kein grosser Schaden am Gebäude!

Quelle: <http://www.wind-sun.com/ForumVB/showthread.php?t=4524>
(Hinweis von T. Spooner, UNSW, TC82)

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

6

Brandbilder von PV-Anlagen (aus Rapport des Sekretärs des IEC TC82, Howard O. Barikmo, Aix-Les-Bains, 10. 2009)



Aus Report TC82, Howard O. Barikmo, 2009

Bakersfield, Kalifornien, April 2009

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

7

Aus Report TC82, Howard O. Barikmo, 2009

Aus Report TC82, Howard O. Barikmo, 2009

Brand an grosser PV-Anlage (mehrere MWp) auf dem Flachdach einer Speditionsfirma in Bürstadt/ D, Juni 2009. Unklar, ob Ursache nur Installationsfehler oder auch Moduldefekt.

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

8

Aus Report TC82, Howard O. Barikmo, 2009

Aus Report TC82, Howard O. Barikmo, 2009

**Brand an Freifeldanlage von PVUSA, Davis, Kalifornien Juni, 2009.
Hier ging Brand anscheinend von Modulanschlussdose (Bypassdioden, schlechte Kontakte ?) aus. Bei grösseren Bränden in Freifeldanlagen: Gefahr von Steppenbränden!**

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

9

2. Gefahren und mögliche Gegenmassnahmen
2.1 Schäden an Anschlusskontakten von Modulen

Geschmolzene Anschlussdosendeckel:
Schon bei geschlossener Anschlussdose beträgt die Temperatur am Punkt E01 über 80°C. Der Deckel ist durchgeschmolzen.

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

10

Grund für Temperaturerhöhung:
Links: Lockere Schraube der Klemme.
Rechts: Litzen des Anschlusskabels teilweise abgebrochen.

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

11

Abhilfe: Module mit geprüften PV-Spezialsteckern

(Bild Multi-Contact AG)

Bei Verwendung von Modulen mit geprüften PV-Spezialsteckern dürfte die Wahrscheinlichkeit für solche Schäden deutlich geringer sein, ausser wenn diese in verschmutztem Zustand zusammengesteckt wurden.

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

12

**2.2 Überhitzte Stellen in Modulen:
Ansicht von vorne**

Stark erhitzter Kontaktstreifenübergang
Bei diesem Modul ist schon optisch feststellbar, dass der Übergangswiderstand der Kontaktstreifen zu gross ist und sich die Stelle stark erwärmt.

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

13

Überhitzte Stellen in Modulen: Ansicht von hinten

Auf der Rückseite ist die Folie durchgeschmolzen, die elektrische Sicherheit ist somit nicht mehr gegeben. Die Stelle erwärmt sich massiv ($> 90^{\circ}\text{C}$!).

Bei manchen älteren Anlagen sind auf thermografischen Aufnahmen des PV-Generators etliche solche heissen Stellen zu finden, die längerfristig zu Schäden führen dürften.

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

14

Solche überhitzten Stellen in Modulen sind primär ein Qualitätsproblem des Modulherstellers, das Langzeitschäden mit möglicher Lichtbogenbildung zur Folge haben kann.

Neuere Entwicklung: An gewissen Modulen bereits nach relativ kurzer Betriebszeit (wenige Jahre) beobachtet (siehe letzte Nummern der Zeitschrift Photon Ende 2009).

Mögliche Abhilfe: Lichtbogendetektor (z.B. im Wechselrichter)

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

15

2.3 Blitzbedingte Schäden an Bypassdioden

Bypassdiode in Sperrrichtung beansprucht

n_z Zellen in Serie in Schleife

Bypassdiode und Solarzellendioden werden in der Front des nahegelegenen Blitzstroms i_A in Sperrrichtung beansprucht. Beim Überschreiten der Durchbruchspannung können sie bei nicht allzu hohen Strömen ohne Schaden ganz kurze Zeit im Durchbruchs-(Avalanche-)Bereich arbeiten (z.B. 100 A während 5 μs).

Bei grösseren Strömen \Rightarrow Zerstörung der Bypassdiode \Rightarrow schlechter Kurzschluss \Rightarrow Gefahr

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

16

Hochspannungslabor der BFH-TI: Stossstromgenerator mit einem zu Testzwecken montierten Solargenerator aus drei Modulen Kyocera KC60.

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

17

Bypassdioden-(Avalanche-)Rückstrom i_{BR} in einem Modul KC60 im Abstand von 40 cm von einem Blitzstrom (grün) mit $i_{\text{max}} \approx 79 \text{ kA}$ und $di/dt_{\text{max}} \approx 20 \text{ kA}/\mu\text{s}$. In diesem Fall überlebte die Diode gerade noch.

Im Avalanchebetrieb: Spannung (rot) während 5 μs auf $\approx 90 \text{ V}$ begrenzt, Spitzenstrom (violett) ist etwa 240 A und die Avalanche-Energie etwa 78 mJ.

Verwendete Bypassdiode: 80SQ045 (Nenn-Sperrspannung $U_{RRM} = 45 \text{ V}$).

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

18

Bypassdioden-(Avalanche-)Rückstrom i_{BR} in einem Modul KC60 im Abstand von 40 cm von einem Blitzstrom (grün) mit $i_{\text{max}} \approx 86 \text{ kA}$ und $di/dt_{\text{max}} \approx 22 \text{ kA}/\mu\text{s}$. In diesem Fall wurde die Diode zerstört.

Die Diode fällt schon nach etwa 1 μs aus, die Spannung (rot) bricht zusammen und der Strom (violett) steigt auf etwa 360 A

Verwendete Bypassdiode: 80SQ045 (Nenn-Sperrspannung $U_{RRM} = 45 \text{ V}$).

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

19

Abhilfe:

- Module mit geschlossenem Metallrahmen verwenden (Kurzschlusswindung, induzierte Spannungen und Ströme deshalb ca. 2,5 – 6 mal schwächer)!
- Stärkere Bypassdioden oder Kombinationen von Bypassdioden und Avalanchedioden verwenden (Problem von mehreren Modulherstellern inzwischen erkannt)
- Neue Konzepte (elektronischer Bypassdiodenersatz von FhG/ISE), bisher noch kein serienmässiger Einsatz

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

20

2.4 Schäden in Generatoranschlusskästen



Schmelbrand im Generatoranschlusskasten einer 11 Jahre alten PV-Anlage von 15 kW mit U_{MPP} ca. 500V

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

21



Detailaufnahme des Brandherdes. Vermutlich hat sich eine Lötstelle im Laufe der Zeit überhitzt und ist dann während einer Strahlungsspitze unter Lichtbogenbildung durchgeschmolzen.

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

22

Weiterer, noch schlimmerer Brandfall:



Durch Serielichtbögen bereits verkohlte Leiterbahnen in Generatoranschlusskasten einer anderen, analogen Anlage mit 20kW (U_{MPP} ca. 500V) vor der Entwicklung des endgültigen, katastrophalen Brandes. Vor dem Öffnen des Schrankes war die Leistung bereits stark reduziert. (Bild EBL)

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

23



Kurz nach der ersten Aufnahme entwickelte sich nach dem Öffnen des Schrankes (Ermöglichung des Luftzutritts) ein starker Lichtbogen zwischen + und -, der sogar ein Loch in der Rückwand des Metallschranks schmolz. (Bild EBL)

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

24



Durch den Brand im Generatoranschlusskasten verursachte Schäden an der Aussenisolation des Gebäudes, auf welche der Kasten montiert war. (Bild EBL)

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

25

Auch bei einer 3kW-Anlage traten Schäden im Generator-Anschlusskasten auf (Unterbruch durch verschmorten Brückenstecker, danach Betrieb nur mit halber Leistung). Da U_{MPP} hier nur ca. 100V betrug, traten keine schwereren Schäden auf.

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

26

2.5 Lichtbogendetektor (LBD), kann viele Schäden verhindern

DC-Speisung
Lichtbogen-Detektor
ED
IDF
INT
DC-Trennschalter
Wechselrichter (WR)
Netz
Speisungen 4a, 4b (blau)
bis > 100m

Beim Auftreten eines Serie-Lichtbogens entsteht im LBD in einer Kombination von 2 Resonanzkreisen ein HF-Signal, das nach gewissen Kontrollen zur Vermeidung von Fehlauslösungen die DC-Seite des WR freischaltet. Bei autonomen LBD: Speisung direkt ab PV-Anlage. Wenn nötig: Abschaltung mit teurem, elektrisch auslösbarem DC-Schalter. Beim Einbau in einen WR entfallen die teuren Elemente (4) und (5).

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

27

2.6 Konzepte zur Spannungsreduktion bei Katastrophen

Auftrennung der DC-Seite im Brandfall (automatisch oder manuell)

Kästen mit Not-Trennern (öffnen z.B. bei hoher Temperatur)
zusätzliche Verkabelung

Idee Ing. Büro Willer, D-85368 Moosburg :
Bei Brand werden alle Stränge durch unter Federspannung stehende PV-Spezialstecker in Sektionen mit $U \leq 120V$ aufgetrennt. Auch mechanische Auslösung durch Schlag mit Feuerwehrraxt möglich. Deutlich längere Verkabelung nötig!

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

28

Alle Stränge sind durch unter Federspannung stehende PV-Spezialstecker in Sektionen mit $U \leq 120V$ unterteilt. In den Löchern stecken im Funktionsmuster Stifte aus Lötzinn (kann kriechen!), die bei höheren Temperaturen durchschmelzen. Auch durch Schläge auf das Keramikrohr ist eine Auslösung möglich. Billig, aber deutlich längere und kompliziertere Verkabelung nötig, zuverlässig ?!

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

29

Ein ähnliches Konzept wurde bereits früher realisiert: Die Photovoltaik-Testanlage des PV-Labors der BFH-TI, an der auch Studenten arbeiteten, wurde bereits 1993 so aufgebaut, dass beim Drücken der Not-Aus Taste die ganze Anlage in Sektionen mit $U \leq 120V$ zerfällt.

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

30

PV-Anlage mit Modul-Wechselrichtern

Bei Anlagen mit Modulwechselrichtern ist keine gefährliche DC-Spannung mehr vorhanden und alle Wechselrichter schalten nach dem Abschalten des Netzes durch die Feuerwehr sofort ab.

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner **brenet** 31

Neue Idee: Leistungsoptimierer, DC-Bus und Spezialinverter:

Regelung auf $U = \text{konstant}$ (z.B. 400 V),
bei Teilbeschattung U_i unterschiedlich!

Von einigen Herstellern (z.B. Solaredge) werden seit kurzem Systeme angeboten, mit individuellen DC-DC-Wandlern (MPP-Tracker) pro Modul, die seriell verschaltet sind, auf eine konstante DC-Spannung arbeiten und über diese Leitung dauernd mit einem speziellen Wechselrichter kommunizieren. Nach Herstellerangaben schalten diese Systeme auch bei Lichtbögen von selbst ab.

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner **brenet** 32

Stromschlag durch hohe DC-Spannung

Geerdetes Metalldach aus Kupfer

Bei dieser PV-Anlage (mit trafolosem Wechselrichter) entstand bei Reparaturarbeiten am Dach durch Unachtsamkeit der Handwerker ein Schwelbrand *unter der PV-Anlage*. Als sich die Feuerwehr Zugang zum Brandherd verschaffen wollte, erlitt ein Feuerwehrmann einen Stromschlag.

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner **brenet** 33

3. Schäden durch Schneedruck und Dachlawinen

$F_N = m \cdot g \cdot \cos\beta$
 $F_A = m \cdot g \cdot \sin\beta$

Abgleiten, wenn $\mu_0 < \tan\beta$!

Einige Zeit nach dem Schneefall auftretende typische Belastung von um den Winkel β angestellten Solargeneratoren. Wenn der Haftreibungskoeffizient $\mu_0 < \tan\beta$ wird (z.B. bei zu grossem β oder nach Bildung eines Schmelzwasserfilms), kann der Schnee abrutschen \Rightarrow Schäden an Fläche und Kante Bei Anlagen auf Hausdächern: Gefahr von Dachlawinen!

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner **brenet** 34

(Bild Schletter Solar-Montagesysteme GmbH, Anlage nicht von dieser Firma erstellt)

Durch zu hohe Schneelast zerstörte Solarmodule bei einer PV-Anlage in Deutschland. Ein Modul ist durch zu hohe Normalkraft eingedrückt und bei mehreren Modulen ist die Unterkante des Rahmens durch die Hangabtriebskraft abgerissen!

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner **brenet** 35

Ansicht eines Teilgenerators der PV-Anlage Mont Soleil am 8. 3. 2009. Er ist bis fast ganz oben mit einer dicken Schneeschicht bedeckt, die aber teilweise bereits nach unten abgerutscht ist. Das Speichervolumen vor den Modulen ist für den vielen Schnee in diesem schneereichen Winter 2008/09 ungenügend, die Module sollten höher und steiler montiert sein.

(Bild Pierre Berger, Mont Crosin)

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner **brenet** 36

Defekte Module (rahmenlos, dünnes Glas)

Ansicht eines bereits schneefreien Teilgenerators der PV-Anlage Mont Soleil Ende März 2009. Durch den starken Schneedruck sind unten zwei Module beschädigt (abgeknickt) und sogar in der Mitte hat ein Modul den Schneedruck nicht überlebt.

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

37



Detailansicht eines durch Schneedruck beschädigten rahmenlosen Moduls der PV-Anlage Mont Soleil. Wie die meisten beschädigten Module liegt es in der untersten Reihe, wo der Schneedruck am grössten ist (vergl. Folie 33 und 35).

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

38



Schmorstelle nach Erdschluss

Detailansicht des durch Schneedruck beschädigten rahmenlosen Moduls der PV-Anlage Mont Soleil, das sogar einen Erdschluss verursacht hat (Schmorstelle rechts unten).

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

39

Auf gefrorenen Solargeneratoren kann nasser Schnee auch bei relativ grossen Neigungswinkeln (beobachtet bei bis zu 60°!) zunächst haften bleiben und erst später in Form von Dachlawinen abgleiten. Besonders gefährdet sind dabei dachintegrierte Anlagen ohne Modulkanten.

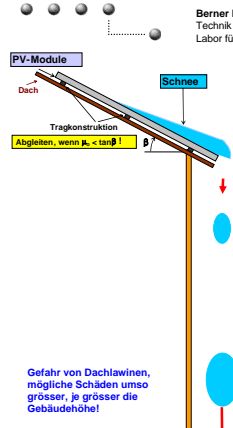


(Bild 3S Swiss Solar Systems AG) (Bild Ernst Schweizer AG)

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

40



Ein solcher Schaden wurde im Winter 2008/2009 bei einer 17kW-Anlage mit gerahmten Modulen mit $\beta \approx 30^\circ$ auf dem Dach einer ca. 10m hohen Turnhalle in Ersigen (Bern) registriert. Dabei wurden zwei parkierte Autos massiv beschädigt (eingedrückte Frontscheibe, Schnee im Auto) und nur durch Glück keine Person verletzt. Gegen solche Schäden durch Dachlawinen sollten besonders bei grösseren Gebäudehöhen geeignete Schutzmassnahmen (Abspernungen im Winter, Schneefänger) ergriffen werden.

Gefahr von Dachlawinen, mögliche Schäden umso grösser, je grösser die Gebäudehöhe!

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

41

4. Zusammenfassung und Ausblick

- Die langfristig vorhandenen Gefahren auf DC-Seite von PV-Anlagen dürfen nicht unterschätzt werden und sollten bei der Anlagenauslegung berücksichtigt werden.
- Auf Gebäuden besonders bei dachintegrierten Anlagen nicht zu hohe DC-Spannungen verwenden.
- Nur hochqualitative Module ohne interne Kontaktprobleme mit robusten Bypassdioden und qualitativ hochwertigen PV-Steckern verwenden, an richtigen Befestigungspunkten montieren, Steckerverschmutzung auf Baustelle verhindern.
- Lichtbogendetektoren würden eine zusätzliche Sicherheit mindestens gegen Seriellichtbögen bringen.
- Konzepte zur Reduktion der PV-Generatorspannung im Katastrophenfall (oder auch beim Service) weiter verfolgen, heute noch keine optimale Lösung vorhanden.
- Gefahr von Schneedruck und Dachlawinen berücksichtigen.

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet

42

Verdankungen

Das Photovoltaiklabor der BFH-TI ist seit 1988 auf dem Gebiet der Photovoltaik-Systemtechnik tätig und konnte sich auf diesem Gebiet eine grosse Erfahrung erwerben. Dies erfolgte primär in mehreren vom BFE, aber auch von der Elektrizitätswirtschaft finanzierten Projekten (u.a. PSEL, Localnet AG, GMS, BKW, EBL). All diesen Institutionen und dem Kanton Bern als Träger der BFH sei an dieser Stelle für ihre wertvolle Unterstützung gedankt.

Ich danke auch all meinen ehemaligen und gegenwärtigen Assistenten, die im Laufe dieser langen Zeit an diesen Projekten mitgearbeitet und zum Aufbau des Photovoltaiklabors beigetragen haben.



ENDE

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Ich stehe Ihnen nun gerne für
allfällige Fragen zur Verfügung

www.pvtest.ch